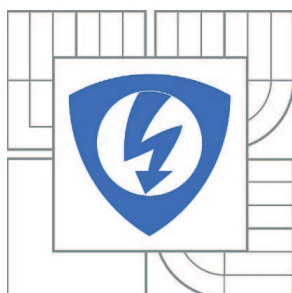


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

PROBLEMATIKA PROVOZU ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN V PRAXI A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ PRO NAPÁJENÍ OSTROVNÍCH SÍTÍ

OPERATION OF SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS AND EMPLOYMENT OF
SELF-EXCITED INDUCTION GENERATORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

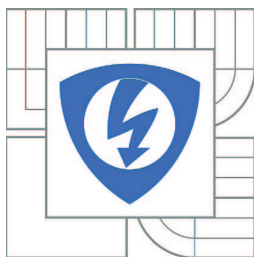
Bc. VINCENC HORNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Vincenc Horník

ID: 106196

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Problematika provozu asynchronních generátorů malých vodních elektráren v praxi a možnosti jejich využití pro napájení ostrovních sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukci a princip funkce asynchronních generátorů a jejich provozu v ostrovní síti. Navrhněte statickou budicí jednotku asynchronního generátoru.
2. Provedte simulaci provozu asynchronního generátoru v ostrovní síti s navrženou statickou budicí jednotkou.
3. Měřením na dynamometru ověřte výsledky simulace a vlastnosti navržené jednotky.
4. Provedte a zhodnoťte výsledky měření při nasazení navržené statické budicí jednotky v praxi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 17.9.2012

Termín odevzdání: 28.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Hlavním zaměřením práce je návrh a konstrukce statické budicí jednotky asynchronního generátoru malé vodní elektrárny s ohledem na ekonomickou a technickou náročnost. Dále popis problematiky buzení asynchronních generátorů a možného technického řešení provozu asynchronních generátorů v ostrovních sítích.

Abstract

The main focus of the work is the design and construction of static excitation unit of asynchronous generator small hydro power plants with regard to the economic and technical demands. Description of the issue excitation asynchronous generators and possible technical solutions use asynchronous generators in island networks.

Klíčová slova

Regulace, buzení, synchronní, asynchronní, generátor.

Keywords

Regulation, exciting, synchronous, asynchronous, generator.

Bibliografická citace

HORNÍK, V. *Problematika provozu asynchronních generátorů malých vodních elektráren v praxi a možnosti jejich využití pro napájení ostrovních sítí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 65s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma „Problematika provozu asynchronních generátorů malých vodních elektráren v praxi a možnosti jejich využití pro napájení ostrovních sítí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek.....	8
1 Úvod.....	9
1.1 Malé vodní elektrárny	9
2 Generátory	10
2.1 Asynchronní generátory	10
2.2 Synchronní generátory	10
2.3 Princip funkce asynchronního motoru	11
2.4 Princip funkce asynchronního generátoru.....	13
2.5 Asynchronní generátor v ostrovní síti	23
3 Napájení ostrovní sítě asynchronním generátorem	27
3.1 Ostrovní síť s instalovaným výkonem jednotek kilowattů	27
3.2 Ostrovní síť s instalovaným výkonem stovek kilowattů.....	27
4 Technické řešení provozu asynchronních generátorů	27
4.1 Pasivní budicí systémy asynchronních generátorů	27
4.2 Aktivní budicí systémy asynchronních generátorů.....	30
5 Statická budicí jednotka asynchronního generátoru	32
5.1 Blokový návrh statické budicí jednotky AG.....	32
5.2 Konstrukční řešení budicí jednotky	33
6 Konstrukce budicí jednotky AG	34
6.1 Výkonová část.....	34
6.2 Řídicí část budicí jednotky	37
6.3 Nastavení budicí jednotky	39
6.4 Vybrané elektrické parametry budicí jednotky.....	39
7 Simulace provozu AG v ostrovní síti se SBJ	40
7.1 Matematický popis SEIG	40
7.2 Parametrizace zjednodušeného modelu SEIG	42
7.3 Návrh a simulace regulátoru SBJ	46
8 ověření výsledků simulace měřením na seig	50

8.1 Měření SEIG v laboratořích VUT	50
8.2 Porovnání naměřených výsledků.....	52
9 Nasazení statické budicí jednotky AG v praxi.....	55
9.1 Sledované parametry.....	55
9.2 Buzení asynchronního generátoru 5,5kW	56
9.3 Buzení asynchronního generátoru 30 kW	58
9.4 Měření pracovní charakteristiky vodního motoru pomocí SBJ.....	61
10 Závěr.....	62
Seznam použité literatury	63
Seznam symbolů a zkratk	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.2.1 Vodič v magnetickém poli.....	12
Obr.2.2 Zjednodušené schéma konstrukce indukčního motoru.....	13
Obr.2.3 Zjednodušené obvodové schéma AM	14
Obr.2.3 Rekonstruovaná pracovní charakteristika asynchronního stroje.....	18
Obr.2.4 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s=0$	20
Obr.2.5 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s>0$	21
Obr.2.6 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s<0$	22
Obr.2.7 Buzení asynchronního generátoru kondenzátory v zapojení Y.....	24
Obr.2.8 Buzení asynchronního generátoru kondenzátory v zapojení D	25
Obr.4.1 Asynchronní generátor buzený pevnou kondenzátorovou baterií	28
Obr.4.2 Zapojení zátěže AG přes kondenzátory	28
Obr.4.3 Zapojení zátěže AG i budicí baterie přes sériové kondenzátory	29
Obr.4.4 Zapojení jednofázové zátěže na 3f. AG	29
Obr.4.5 Zapojení speciálního jednofázového AG.....	29
Obr.4.6 Zapojení AG s regulací výstupního napětí.....	30
Obr.4.7 Zapojení AG se čtyřkvadrantovým měničem	31
Obr.4.8 Zapojení jednofázového AG s el. řízením budicího proudu	31
Obr.4.9 Asynchronní generátor buzený PWM ve spolupráci s AM	32
Obr.5.1 Blokový návrh řízení AG	33
Obr.5.2 Stykač LC1DPK12 pro spínání kondenzátorových baterií[11]	34
Obr.6.1 Zapojení výkonové části budicí jednotky.....	36
Obr.6.2 Sestavená statická budicí jednotka AG	37
Obr.6.3 Zapojení řídicí části budicí jednotky	38
Obr.7.1 Schéma SEIG.....	40
Obr.7.2 Schéma SEIG přizpůsobené pro zjednodušený matematický popis	41
Obr.7.3 Model SEIG v programu SIMULINK.....	45
Obr.7.4 Model řízení jednotlivých stupňů SBJ v programu SIMULINK	46
Obr.7.5 Model diskrétního PID regulátoru v programu SIMULINK.....	47

<i>Obr.7.6 Zapojení modelu SEIG pro zkoumání jeho dynamických vlastností.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr.7.7 Simulace řízení SEIG statickou budicí jednotkou.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr.7.8 Odezva výstupů SEIG a regulátoru na změnu otáček</i>	<i>49</i>
<i>Obr.7.9 Odezva výstupů SEIG a regulátoru na změnu napětí.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr.8.1 Zapojení měřicího pracoviště</i>	<i>50</i>
<i>Obr.8.2 Zatěžování SEIG při připojení kondenzátorové baterii 1,2mF</i>	<i>53</i>
<i>Obr.8.3 Zatěžování SEIG při připojení kondenzátorové baterii 292,5μF</i>	<i>53</i>
<i>Obr.8.4 Zatěžování SEIG při připojení kondenzátorové baterii 105μF</i>	<i>54</i>
<i>Obr.8.5 Nezatížený SEIG s malým momentem setrvačnosti.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr.9.1 Grafický záznam z měření nezatíženého AG 5,5kW</i>	<i>56</i>
<i>Obr.9.2 Grafický záznam z měření zatíženého AG 5,5kW</i>	<i>58</i>
<i>Obr.9.3 Grafický záznam z měření nezatíženého AG 30kW</i>	<i>59</i>
<i>Obr.9.4 Grafický záznam z měření zatěžovaného AG 30kW</i>	<i>60</i>
<i>Obr.9.5 Závislost výkonu vodního motoru na otáčkách</i>	<i>61</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.2.1 Tabulka vstupních – výstupních údajů pracovní charakteristiky AM 1LG6253-8AB 30kW</i>	<i>19</i>
<i>Tab.2.1 Tabulka kompenzačních kondenzátorů z produkce ZEZ Silko[8].....</i>	<i>26</i>
<i>Tab.6.1 Parametry součástek statické budicí jednotky</i>	<i>40</i>
<i>Tab.7.1 Odezva regulované veličiny na minimální zásah SBJ.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab.8.1 Záznam z měření na SEIG</i>	<i>51</i>
<i>Tab.8.2 Přepočet naměřených hodnot na 1f model SEIG</i>	<i>52</i>
<i>Tab.9.1 Vybrané hodnoty ze záznamu nezatíženého AG 5,5kW.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab.9.2 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu zatíženého AG 5,5kW.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab.9.3 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu nezatíženého AG 30kW.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab.9.4 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu zatěžovaného AG 30kW.....</i>	<i>60</i>

1 ÚVOD

1.1 Malé vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou významným energetickým zdrojem každé energetické soustavy, zejména pro svoji schopnost nepřetržité dodávky stabilního výkonu, schopnost pružné a hospodárné regulace a schopnost akumulace. Z pohledu životního prostředí se jedná o obnovitelný zdroj energie který svými exhalacemi neznečišťuje okolí. Nezanedbatelný je i jednoduchý technologický proces výroby díky kterému se vodní elektrárny ve výrobě elektrické energie uplatňují již od konce 19. století.

Na našem území byla jednou z prvních vodní elektrárna Zámecký mlýn v Jindřichově Hradci, která byla zprovozněna v roce 1888. První elektrárny byly většinou tvořeny soustrojím sestávajícím se obvykle z Francisovy turbíny, převodu a dynamu. Vyrobená elektrická energie byla užívána téměř výhradně pro napájení elektrického osvětlení. Postupem vývoje a stále se zvyšujícími požadavky průmyslu byly uváděny do provozu soustrojí s 3 fázovými synchronními generátory.

V roce 1930 bylo v ČR 14800 malých vodních elektráren. V roce 1950 už jenom 5471 [1]. Tento stav byl zapříčiněn státní politikou, jednak nízkou výkupní cenou el. energie a preferencí velkých energetických děl. Vyhláškou Energetického regulačního úřadu [2] byla od 13.8.2002 stanovena vyšší výkupní cena el. energie z MVE, podmíněna celkovou rekonstrukcí elektrárny. Jednou z podmínek rekonstrukce vodních elektráren je i výměna nebo převinutí stávajícího generátoru. Lákavá nabídka vyšší výkupní ceny garantovaná státem tlačí mnoho provozovatelů MVE do rekonstrukcí dle podmínek ERÚ, kteří musí buď zakoupit nový generátor nebo zrekonstruovat starý.

Výběr způsobu rekonstrukce generátoru malé vodní elektrárny je ovlivňován zejména:

- Stávajícím stavem technologie.
- Požadavkem na možnost zvýšení účinnosti výroby elektrické energie.
- Požadovaným způsobem provozu.
- Ekonomickou dostupností pro investora.

Výše uvedené skutečnosti jasně naznačují, že způsob rekonstrukce generátoru bude pro jednotlivé elektrárny, s ohledem na místní podmínky, různý.

Z hlediska rekonstrukce stávajícího generátoru jsou zajímavé lokality s pomaluběžnými synchronními stroji o jmenovitých otáčkách nižších jak 750, s požadavkem na ostrovní provoz a možností startu do tmy. Těmto požadavkům se dá vyhovět i použitím moderních synchronních generátorů nebo za určitých podmínek i asynchronních generátorů. Vážnou komplikací jsou v těchto případech nízké provozní otáčky, kdy je nutno soustrojí doplnit převodem a tak je vyšší účinnost generátoru obvykle degradována účinností převodovky.

Díky moderním technologiím lze i asynchronních motorů využívat v generátorovém provozu v ostrovních sítích obdobně jako generátorů synchronních. Podmínkou takového využití je buzení asynchronního generátoru.

2 GENERÁTORY

2.1 Asynchronní generátory

Širší nasazení asynchronních generátorů v oblasti malých vodních elektráren umožnilo až vybudování spolehlivé tvrdé elektrické sítě, se kterou tyto stroje pracují výhradně v paralelním provozu. Přesto, že buzení asynchronního generátoru bylo popsáno již roku 1935 [3], teprve v posledních letech s vývojem výkonových polovodičových prvků a řídicích systémů je možno provozovat asynchronní generátory i v ostrovním režimu.

V rámci rekonstrukce vodních elektráren se obvykle používají asynchronní generátory do výkonu cca 200 kW a jmenovitých otáček 750 n/min. Synchronní otáčky generátoru jsou dány počtem pólových párů statorového vinutí. Vícepólové asynchronní generátory jsou používány jen výjimečně, problematika přizpůsobení otáček turbíny a generátoru je většinou řešena mechanickým převodem. Protože asynchronní generátor potřebuje pro svoji činnost jalový výkon, jehož velikost je dána konstrukcí a výkonem generátoru, je nutné aby byly tyto elektrárny vybaveny kompenzačním zařízením.

Asynchronní generátory uvedených výkonů jsou preferovány zejména pro nižší cenu, protože se jedná o sériové výrobky konstrukčně shodné s asynchronními motory. Vodní turbíny pracují s konstantními otáčkami, není potřeba regulovat otáčky, proto se v tomto odvětví energetiky zatím elektronické výkonové regulátory neuplatnily. Jiná situace je u větrných elektráren, které mohou pracovat s různými otáčkami a je nutné dodávat do sítě el. energii konstantních parametrů. Parametry dodávané energie do distribuční sítě jsou obsaženy v dokumentu „Pravidla provozovatelů distribučních soustav“ [4] a v ČSN EN 50160. Pro konstrukci větrných elektráren jsou používány asynchronní generátory o výkonech až jednotek MW.

2.2 Synchronní generátory

Oproti asynchronním generátorům mají spoustu výhod, které jsou na druhou stranu vyváženy vyšší pořizovací cenou. Synchronní generátory mohou být provozovány jak v ostrovním provozu (do samostatné zátěže), tak paralelně s distribuční sítí. Díky řízenému buzení umožňují synchronní generátory udržovat konstantní výstupní napětí při práci do samostatné zátěže a konstantní fázový úhel mezi napětím a proudem při paralelní práci se sítí. Připojování synchronního generátoru na síť se uskutečňuje v okamžiku kdy má generátor i síť shodné efektivní hodnoty napětí, stejný sled fází, shodný kmitočet a shodné okamžité hodnoty napětí.

Pokud jsou dodrženy uvedené podmínky připojení generátoru k síti, nedochází k žádným významným přechodovým dějům, které by síť negativně ovlivňovaly. Oproti tomu asynchronní generátory, v momentě připojení, zatíží síť minimálně magnetizačními proudy.

Pro výrobu elektrické energie ve výrobnách pracujících do samostatné sítě a výrobnách větších výkonů se téměř výhradně uplatňují právě synchronní generátory. V poslední době se pro malé výkony konstruují i generátory s permanentními magnety.

Právě v oblasti výroby elektrické energie vodními elektrárnami jsou využívány pomaluběžné synchronní generátory speciálně konstruované pro dané lokality. Mezi v současnosti provozovanými synchronními generátory jsou také stroje vyrobené počátkem 20 století.

Protože náhrada takového, stále funkčního, generátoru je společně s investicí do opravy technologie dle požadavků ERÚ investičně značně náročná, nabízí se zde úspornější varianta, kterou je rekonstrukce generátoru nebo jeho náhrada generátorem asynchronním.

Při použití asynchronního generátoru je za předpokladu splnění určitých podmínek možno zachovat takové vlastnosti technologie, jako by byla osazena generátorem synchronním.

2.3 Princip funkce asynchronního motoru

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, pracující na střídavý proud. Tok energie mezi hlavními částmi motoru (stator a rotor) je realizován výhradně pomocí elektromagnetické indukce, proto se tento motor také označuje jako motor indukční. Vynález asynchronního motoru je úzce spjat s objevem možnosti vytvoření točivého magnetického pole pomocí dvou cívek napájených střídavým proudem s fázovým posunem 90°. Tento objev učinil Nikola Tesla (1856 – 1943) již v roce 1888 a tím odstranil poslední překážku v rozvoji distribučních sítí vícefázového střídavého proudu, které postupně vytlačily původně převládající rozvody stejnosměrného proudu.[5]

Základním poznatkem objasňujícím funkci asynchronního motoru je, po roce 1820 Michaelem Faradayem (1791 – 1867), experimentálně objevená skutečnost, že na vodiči pohybujícím se v magnetickém poli vzniká elektrické napětí. Velikost tohoto indukovaného napětí je přímo úměrná magnetické indukci „ B “, délce vodiče „ l “ a rychlosti „ v “, kterou se vodič pohybuje. Matematicky byla tato závislost popsána až r. 1845 teoretikem F.E.Neumannem (1798-1895) a dále zařazena J.C. Maxwelllem (1831-1879) do Maxwellovy soustavy hlavních rovnic elektromagnetického pole.[3]

Vzájemný vztah výše uvedených veličin lze, pro případ kolmého pohybu vodiče k vektoru magnetické indukce, zapsat:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (2.1)$$

U_i - Indukované napětí [V] = [m² kg s⁻³ A⁻¹]

B - Magnetická indukce [T] = [kg s⁻² A⁻¹]

l - Délka vodiče [m]

v - Rychlost pohybujícího se vodiče [m s⁻¹]

Zapojíme-li tento pohybující se vodič do elektrického obvodu tak, aby indukované napětí vyvolalo tok proudu, začne na vodič působit síla F , jejíž velikost je dána vztahem :

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (2.2)$$

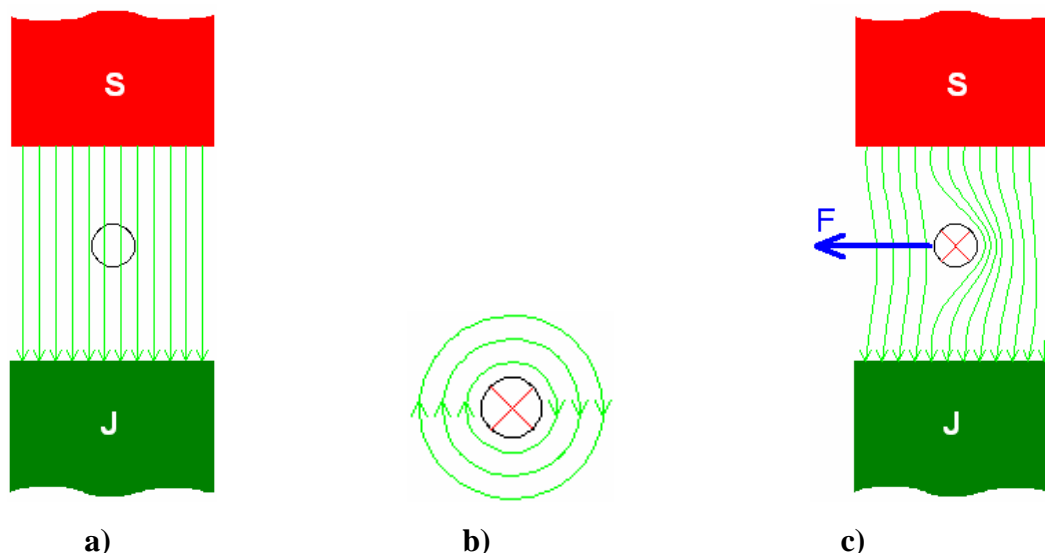
F - Síla působící na vodič [N]

I - Proud protékající vodičem [A]

Tento poznatek je v praxi uplatňován při konstrukcích magnetického tlumení mechanických ústrojí měřících přístrojů. Jako příklad lze uvést obecně známý mechanický elektroměr, kde se nemagnetický hliníkový kotouč představující vodič zapojený nakrátko, pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu.

Výše uvedený fyzikální jev popisuje Lenzův zákon (německý fyzik Henrich Lenz, 1804-1865). Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která jej vyvolala.

Pro názornější představu vzájemného působení magnetických a elektromagnetických polí, z nichž vychází výše uvedené vztahy (2.1) a (2.2), je uveden popis pomocí Ampérova a Flemingova pravidla:



Obr.2.1 Vodič v magnetickém poli

Na **Obr. 2.1 a)** je vodič umístěn v magnetickém poli permanentního magnetu, vodič se nepohybuje. Na tento vodič nepůsobí žádné síly bez ohledu na to, zda je nakrátko nebo tvoří otevřenou smyčku.

Obr. 2.1 b) znázorňuje vodič protékaný proudem ve směru od pozorovatele. Orientaci magnetických indukčních čar zjistíme pomocí Ampérova pravidla pravé ruky, které zní:

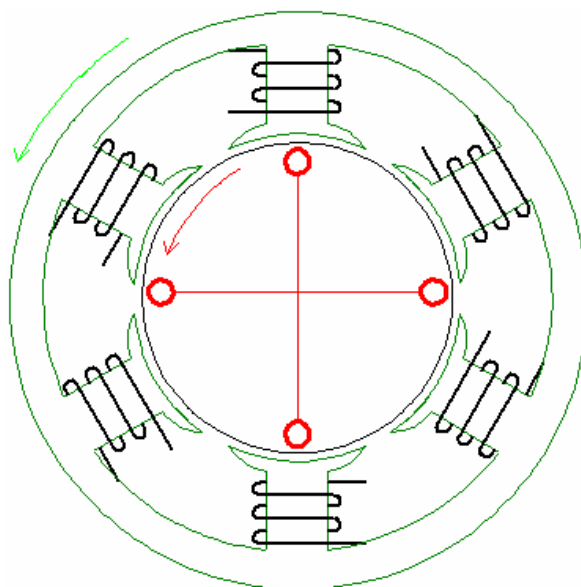
„Jestliže palec pravé ruky ukazuje směr elektrického proudu ve vodiči, pak pokrčené prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.“

Umístíme-li vodič protékaný proudem do magnetického pole **Obr. 2.1 c)** , bude na vodič působit síla ve směru, který určíme podle Flemingova pravidla levé ruky:

„Položíme-li otevřenou levou ruku na vodič tak, aby magnetické indukční čáry vstupovaly do dlaně a prsty ukazovaly směr proudu, vychýlí se vodič na stranu palce“.

Představíme-li si na základě výše uvedených poznatků vodič (závit nakrátko) umístěný v pohybujícím se magnetickém poli, lze usoudit, že na vodič bude působit síla ve směru pohybu magnetického pole. Podaří-li se nám nějakým způsobem vytvořit rotující magnetické pole, zřejmě nebude problém vytvoření rotačního pohybu vodiče v tomto poli umístěného.

Pro vytváření točivého magnetického pole je nejčastěji používána třífázová síť harmonického napětí (50 nebo 60 Hz) v níž jsou jednotlivé fáze vzájemně posunuty o úhel 120°.



Obr.2.2 Zjednodušené schéma konstrukce indukčního motoru

Rotor indukčního motoru je tvořen několika závitů spojenými nakrátko a je vložen do točivého magnetického pole. Velikost magnetického toku procházejícího plochou stojícího závitu indukuje napětí, které jím protlačuje značný proud. Tento proud vybudí své magnetické pole, které spolu s točivým polem statoru vytvoří točivý moment a rotor se roztočí. Budeme-li uvažovat ideální indukční motor beze ztrát, roztočí se jeho rotor na synchronní otáčky a bude se otáčet souhlasně s točivým magnetickým polem. Jeho vodiče neprotínají žádné indukční čáry a neindukuje se v nich napětí. Točivý moment bude nulový. Jestliže se však rotor mechanicky zatíží, musí se zpomalit a indukční čáry začnou protínat vodiče ve kterých se indukuje potřebné napětí které vyvolá proud pro vznik tažné síly.

S rostoucím zatížením se otáčky indukčního motoru zmenšují. Poměrný pokles otáček rotoru n vzhledem k otáčkám točivého magnetického pole n_0 se nazývá skluz.[6]

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (2.3)$$

s - Skluz [-]

n_0 - Otáčky magnetického pole [s^{-1}]

n - Otáčky rotoru [s^{-1}]

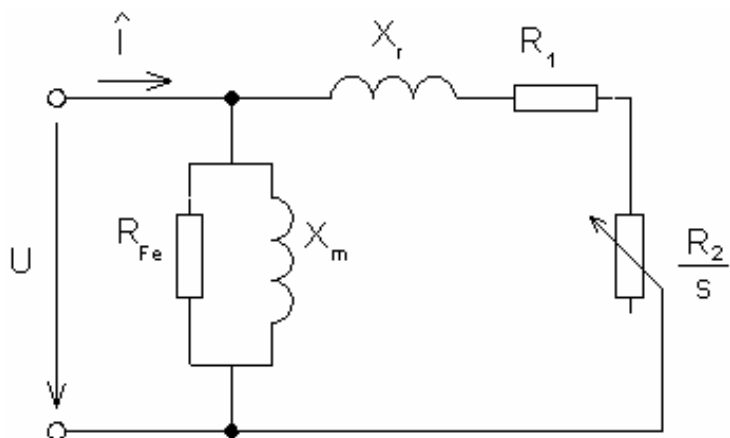
Protože se rotor indukčního motoru neotáčí synchronními otáčkami, nazývá se také asynchronní motor.

2.4 Princip funkce asynchronního generátoru

Přestože je asynchronní motor konstrukčně shodný s asynchronním generátorem, není jednoduché si princip funkce asynchronního generátoru představit. Je obecně známo, že jsou asynchronní generátory využívány pro výrobu el. energie pouze v paralelním spojení s tvrdou distribuční sítí ale jejich další využití je stále diskutováno na mnoha internetových diskusních fórech.

Popíšeme-li učebnicový příklad momentové charakteristiky asynchronního motoru zjistíme, že asynchronní motor přejde do generátorového provozu pouhou změnou orientace momentu na hřídeli [6].

Pro názornou představu funkce asynchronního stroje je dále uveden jeho zjednodušený matematický popis[6] a na jeho základě odvozena pracovní charakteristika skutečného výrobku.



Obr.2.3 Zjednodušené obvodové schéma AM

- U - Fázové napětí [V]
- \hat{I} - Fázový proud [A]
- R_{Fe} - Odpor na němž vznikají činné ztráty magnetického obvodu i mechanické [Ω]
- X_m - Magnetizační reaktance [Ω]
- X_r - Rozptylová reaktance [Ω]
- R_1 - Činný odpor statorového vinutí [Ω]
- R_2 - Činný odpor rotorové klece [Ω]
- s - Skluz [-]
- s_{zv} - Skluz zvratu [-]
- M_m - Mechanický moment [Nm]
- M_{zv} - Moment zvratu [Nm]
- I_2 - Fázový proud podílející se na tvorbě momentu [A]
- m - počet fází [-]
- p - Počet pólových dvojic [-]
- f_1 - Frekvence sítě [-]
- P_m - Mechanický výkon [W]

$$M_m = \frac{m \cdot p \cdot U^2 \cdot R_2}{s \cdot 2\pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_r^2 \right]} \quad (2.4)$$

$$M_{zv} = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_r^2} \right)} \quad (2.5)$$

$$s_{zv} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_r^2}} \quad (2.6)$$

$$P_m = m \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot (1 - s) \quad (2.7)$$

Z katalogu SIEMENS K15-0409CZ “Trojfázové asynchronní motory s rotorem nakrátko 1LG4, 1LG6, osová výška 180 až 315, 11 až 200kW”[7], jsem vybral motor **1LG6 253-8AB..** těchto parametrů:

P_n	- Jmenovitý výkon	30 [kW]
n	- Jmenovité otáčky	735 [min ⁻¹]
$\eta_{4/4}$	- Účinnost při 4/4 výkonu	92,8 [%]
$\eta_{3/4}$	- Účinnost při 3/4 výkonu	93,3 [%]
$\cos \varphi_{4/4}$	- Účíník při 4/4 výkonu	0,82 [-]
$\cos \varphi_{3/4}$	- Účíník při 3/4 výkonu	0,77 [-]
I_n	- Jmenovitý proud	57 [A]
M_n	- Jmenovitý moment	390 [Nm]
M_{zv}	- Moment zvratu	$2,8 \cdot M_n = 2,8 \cdot 390 = 1092$ [Nm]
J	- Moment setrvačnosti	1,06 [kgm ²]
s_{zv}	- Skluz zvratu odečten z momentové charakteristiky “9”[6]	0,14 [-]

- 1) Výpočet velikosti proudu (přepočteného na stator) podílejícího se na tvorbě momentu a krytí ztrát v rotoru, mechanických ztrát. Ztráty ve statoru nejsou uvažovány.

$$I_2 = \frac{M_n \cdot 2\pi \cdot f_1}{m \cdot U \cdot p} = \frac{390 \cdot 2\pi \cdot 50}{3 \cdot 230 \cdot 4} = \underline{\underline{44,39 A}}$$

- 2) Z uvedených jmenovitých otáček podle vztahu 2.3 vypočteme skluz

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{750 - 735}{750} = \underline{\underline{0,02}}$$

- 3) Dosazením již známých hodnot do vztahu 2.7 vypočteme činný odpor rotorové klece:

$$P_m = m \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \cdot (1 - s)$$

$$R_2 = \frac{P_m \cdot s}{m \cdot I_2^2 \cdot (1 - s)} = \frac{30000 \cdot 0,02}{3 \cdot 44,39^2 \cdot (1 - 0,02)} = \underline{\underline{0,1036 \Omega}}$$

- 4) S využitím vztahu 2.6 a dosazením do 2.5 dopočítáme hodnotu R_1

$$s_{zv} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_r^2}}$$

$$\sqrt{R_1^2 + X_r^2} = \frac{R_2}{s_{zv}} = \frac{0,1036}{0,14} = 0,7398 \Omega$$

$$M_{zv} = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_r^2})}$$

$$R_1 = \frac{m \cdot p \cdot U^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot M_{zv}} - \sqrt{R_1^2 + X_r^2} = \frac{3 \cdot 4 \cdot 230^2}{4\pi \cdot 50 \cdot 1092} - 0,7398 = \underline{\underline{0,1854 \Omega}}$$

- 5) Zpětným dosazením do vztahu 2.6 vypočteme X_r

$$\sqrt{R_1^2 + X_r^2} = 0,7398$$

$$\sqrt{0,1854^2 + X_r^2} = 0,7398$$

$$0,1854^2 + X_r^2 = 0,7398^2$$

$$X_r = \sqrt{0,7398^2 - 0,1854^2} = \underline{\underline{0,7162 \Omega}}$$

Dosazením vypočtených hodnot do vztahu 2.4 obdržíme skutečný průběh momentu asynchronního stroje jak v motorickém, tak generátorovém provozu. Protože popsany model asynchronního stroje nezohledňuje fyzikální vlastnosti magnetického obvodu rotoru, se vrůstajícím skluzem jeho přesnost klesá.

Chování asynchronního stroje je v různých provozních stavech ovlivňováno právě konstrukcí rotoru a rotorové klece, při které je využíván magnetický skin efekt. Pro účely této práce je předpokládána pracovní oblast asynchronního stroje pouze v intervalu mezi momenty zvratu, tj. cca (-0,15;0,15), ostatní část grafů má pouze informativní charakter.

Pro ucelenou představu práce asynchronního generátoru, zejména možnost jeho zatěžování, je třeba mít přehled o jeho ztrátách a účinnosti. Tyto informace by pak měly být dostačující pro volbu vhodného stroje z řady sériových asynchronních motorů.

Celkové ztráty při jmenovitém výkonu zvoleného asynchronního motoru jsou:

$$\sum \Delta P_n = P_1 - P_n = \frac{P_n}{\eta_{4/4}} - P_n \quad (2.8)$$

$$\sum \Delta P_n = \frac{30000}{0,928} - 30000 = \underline{\underline{2327,6W}}$$

Ztráty dále rozdělíme na jednotlivé části připadající na rotor a stator. Ztráty připadající na rotor zjistíme tak, že od výkonu na vzduchové mezeře odečteme výkon jmenovitý.

$$\sum \Delta P_{rN} = P_\delta - P_n = M_n \cdot \frac{2\pi \cdot f_1}{p} - P_n \quad (2.9)$$

$$\sum \Delta P_{rN} = 390 \cdot \frac{2\pi \cdot 50}{4} - 30000 = \underline{\underline{630,5W}}$$

$$\sum \Delta P_{sN} = \sum \Delta P_n - \sum \Delta P_r = 2327,6 - 630,5 = \underline{\underline{1697,1W}}$$

Je známo, že ventilační ztráty a ztráty vířivými proudy jsou kvadraticky závislé na otáčkách (frekvenci) budeme tuto závislost předpokládat. Protože nulové mechanické ztráty jsou pouze pokud je skluz roven 1 a rotorové ztráty jsou rovny nule pokud je skluz roven 0, je nutné celkové rotorové ztráty dále rozdělit na tyto dva samostatné díly rotorových ztrát. Z katalogových údajů není možné stanovit v jakém poměru se tyto ztráty na rotorových ztrátách podílejí, proto je nutné mechanické ztráty odhadnout. V tomto případě byla pro další výpočet použita hodnota jmenovitých mechanických ztrát 300W.

$$\Delta P_{mN} = \underline{\underline{300W}}$$

$$\Delta P_m = \Delta P_{mN} \cdot (s - 1)^2 \quad (2.10)$$

$$\Delta P_{elN} = \sum \Delta P_{rN} - \Delta P_{mN}$$

$$\Delta P_{el} = \Delta P_{elN} \cdot \left(\frac{s}{s_n} \right) \quad (2.11)$$

Na statorových ztrátách se podílí ztráty v železe, které jsou konstantní a ztráty na odporu statorového vinutí, závislé na zatížení. Tepelné ztráty na odporu statorového vinutí jsou závislé na velikosti procházejícího proudu:

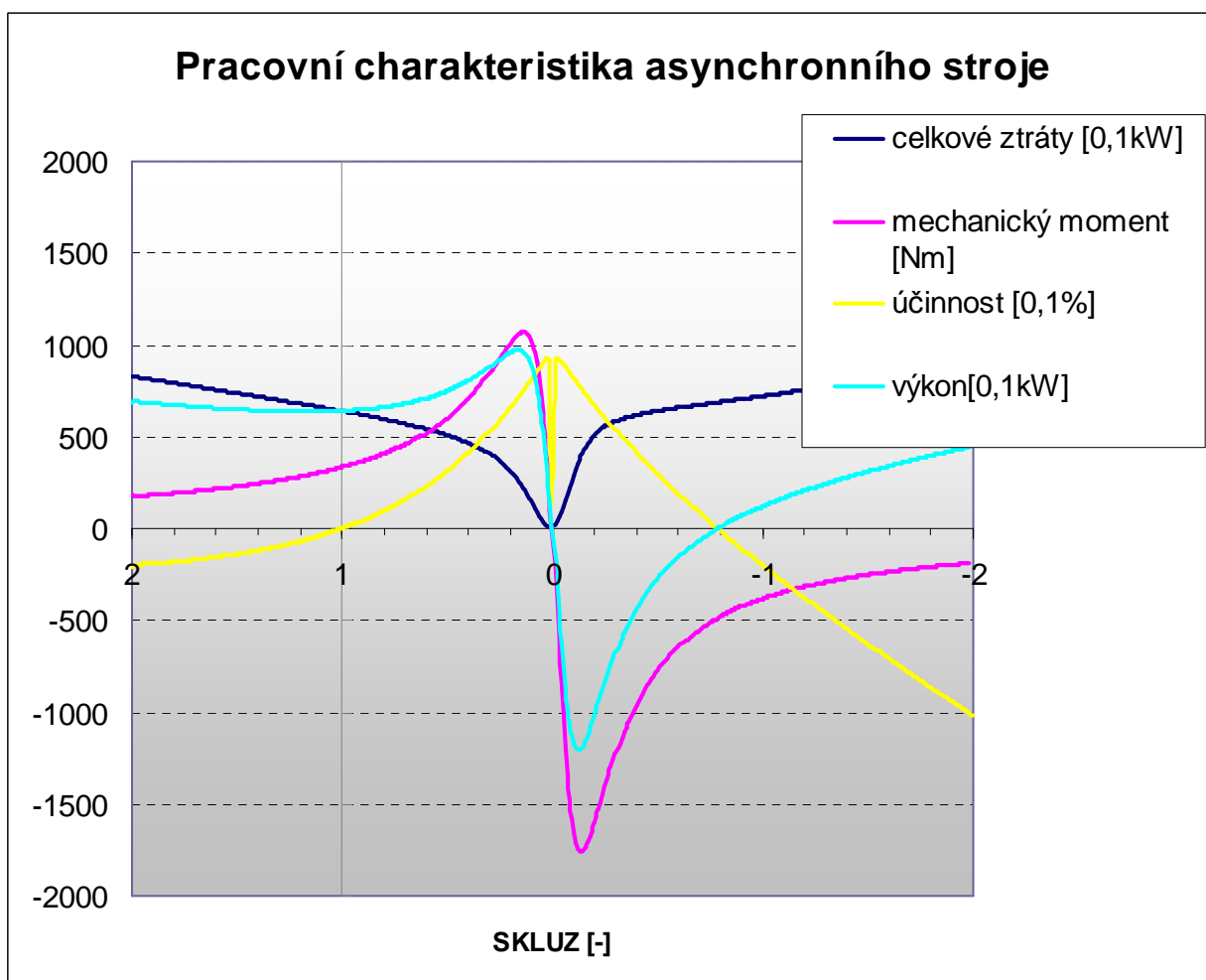
$$\Delta P_{sJ} = m \cdot R_1 \cdot I_2^2 \quad (2.12)$$

Konstantní ztráty v železe statoru určíme jako rozdíl celkových ztrát ve statoru a tepelných ztrát na odporu statorového vinutí:

$$\Delta P_{Fe} = \sum P_{sN} - \Delta P_{sJ} = \sum P_{sN} - m \cdot R_1 \cdot I_2^2 \quad (2.13)$$

$$\Delta P_{Fe} = 1697,1 - 3 \cdot 0,1854 \cdot 44,39^2 = \underline{\underline{601,1W}}$$

Na základě výše popsané matematické analýzy pracovní charakteristiky asynchronního stroje je vytvořena aplikace v programu MS Excel, která rekonstruuje na základě katalogových údajů pracovní charakteristiku konkrétního stroje. Tato aplikace umožňuje rychlou orientaci v možnostech výkonového využití běžného asynchronního motoru jako generátoru.



Obr.2.3 Rekonstruovaná pracovní charakteristika asynchronního stroje

Tab.2.1 Tabulka vstupních – výstupních údajů pracovní charakteristiky AM 1LG6253-8AB 30kW

PROGRAM PRO VÝPOČET PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO STROJE				
PARAMETR (MOTOR)	JEDNOTKA	HODNOTA	VYPOČTENÉ	PARAMETRY
Jmenovité fázové napětí	[V]	230	MOTOR	GENERÁTOR
Frekvence sítě	[Hz]	50		
Počet fází	[-]	3		
Jmenovitý proud	[A]	57		
Jmenovitý výkon (mechanický)	[kW]	30	30	-33,811
Jmenovité otáčky	[n/min.]	735	733,4	765,4
Počet pólů	[-]	4		
Účinnost při 4/4 výkonu	[%]	92,8	92,39	92,7
Účinnost při 3/4 výkonu	[%]	93,3	92,56	92,65
Účinník při 4/4 výkonu	[-]	0,82		
Účinník při 3/4 výkonu	[-]	0,77		
Jmenovitý moment	[Nm]	390	390,71	421,84
Moment zvratu k*Mn	[-]	2,8		
Skluz zvratu	[-]	0,14		
Moment setrvačnosti	[kgm ²]	1,06		
Odhad mech. Ztrát	[W]	300		
Jmenovitý elektrický příkon	[kW]	32,328	32,477	-31,342
Ztráty	[W]	2327,6	2470	2470

Zpětným porovnáním vypočtených hodnot s hodnotami katalogovými byla zjištěna největší odchylka ve velikosti ztrát 6% (ČSN EN 60 034 připouští až 15% u výkonů do 50kW). Ostatní odchylky jsou hluboko pod povolenými tolerancemi výše zmíněné normy.

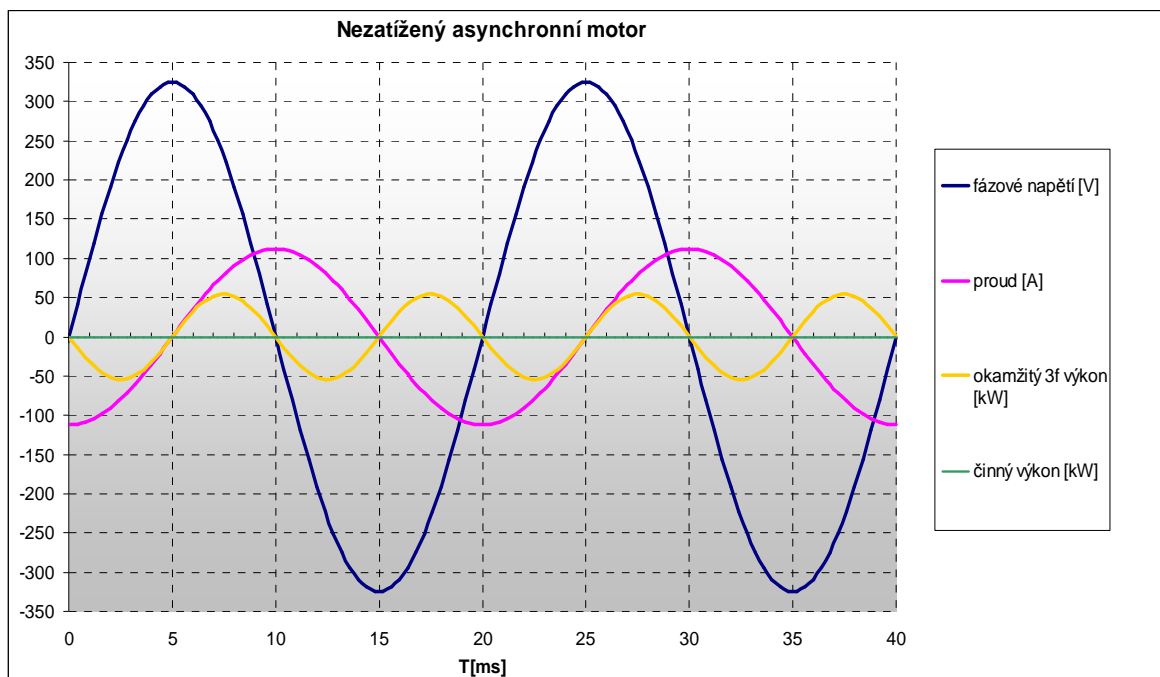
Účinnost stroje zobrazená v grafu je na intervalu skluzu $\langle 2; 0 \rangle$ vypočtena jako poměr mechanického výkonu ku příkonu. Přejed z kladných do záporných hodnot účinnosti je způsoben změnou smyslu otáčení hřídele.

$$\eta_{\langle 2;1 \rangle} = \frac{P_m}{P_{el}} \cdot 1000 \quad (2.14)$$

Na intervalu $\langle 0; -2 \rangle$ je účinnost vypočtena jako poměr elektrického výkonu ku mechanickému příkonu. Přejed účinnosti z kladných do záporných hodnot je způsoben změnou toku energie. Na místo dodávky, začne generátor ze sítě energii spotřebovávat při stejném smyslu otáčení i momentu na hřídeli.

$$\eta_{\langle 0;1 \rangle} = \frac{P_{el}}{P_m} \cdot 1000 \quad (2.15)$$

Pro vysvětlení chování jednotlivých elektrických veličin asynchronního stroje při paralelním chodu se sítí nízkého napětí 400V použijí idealizované parametry třífázového stroje 200kW se synchronními otáčkami 1500 ot./min., při frekvenci sítě 50Hz.



Obr.2.4 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s=0$

Graf uvedený na **Obr. 2.4** znázorňuje průběh proudu a napětí v jedné fázi asynchronního stroje při paralelním chodu se sítí 400V. Dále je zobrazen trojnásobek okamžité hodnoty výkonu v jedné fázi a hodnota celkového činného výkonu stroje. Otáčky rotoru jsou synchronní, $s=0$. Trojnásobek okamžitého výkonu je volen kvůli přehlednějšímu zobrazení grafu.

- Proud je posunutý o 90° za napětím. Proud se zpožďuje o $\pi/2$, při frekvenci sítě 50Hz to je 5ms.
- Účinník, v našem případě idealizovaného stroje je roven $\cos \varphi$ a má hodnotu 0.
- Činný výkon je 0.
- Jalový výkon je roven zdánlivému výkonu.
- Stroj se chová jako čistě induktivní zátěž.

$$S = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{|U_{\max}|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_{0\max}|}{\sqrt{2}} = 3 \cdot \frac{|U_{\max}| \cdot |I_{0\max}|}{2} \quad (2.4)$$

$$S = 3 \cdot \frac{325 \cdot 115}{2} = 56 \text{ kVA}$$

$$Q = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin \varphi = 3 \cdot \frac{|U_{\max}| \cdot |I_{0\max}|}{2} \cdot \sin \varphi \quad (2.5)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{325 \cdot 115}{2} \cdot 1 = 56 \text{ kVAr}$$

S - Zdánlivý výkon [VA]

Q - Jalový výkon [VAr]

U_{ef} - Efektivní hodnota fázového napětí [V]

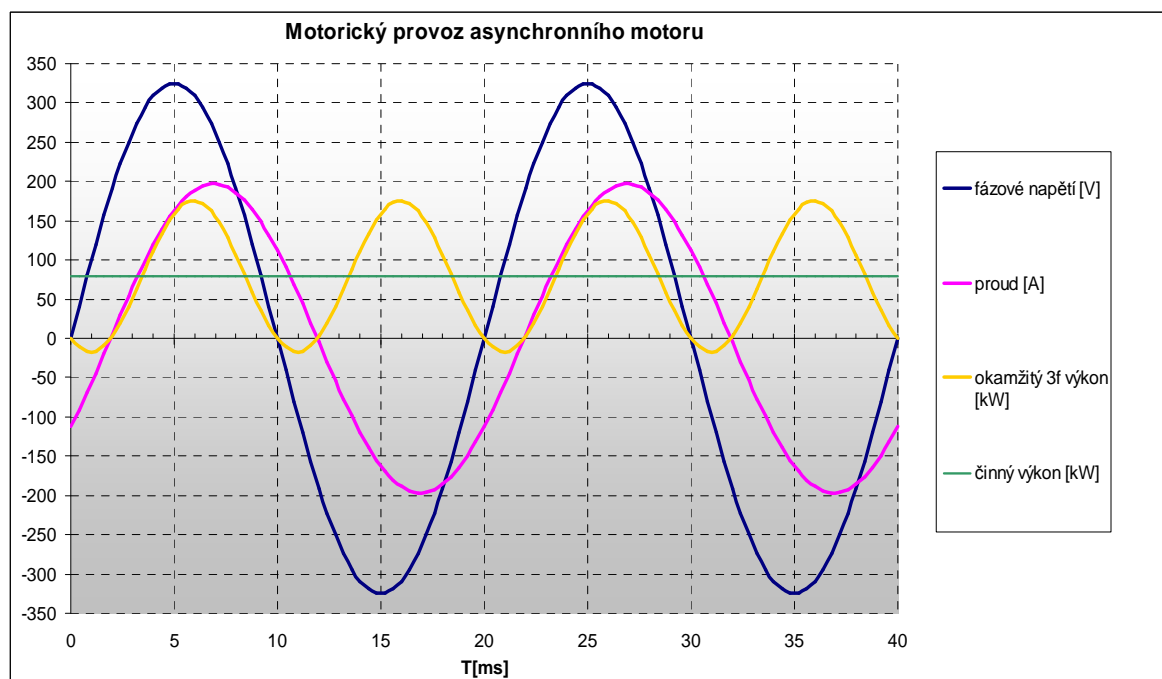
I_{ef} - Efektivní hodnota proudu [A]

U_{\max} - Maximální hodnota napětí [V]

I_{\max} - Maximální hodnota proudu [A]

$I_{0\max}$ - Maximální hodnota magnetizačního proudu [A]

I_{0ef} - Efektivní hodnota magnetizačního proudu [A]



Obr.2.5 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s > 0$

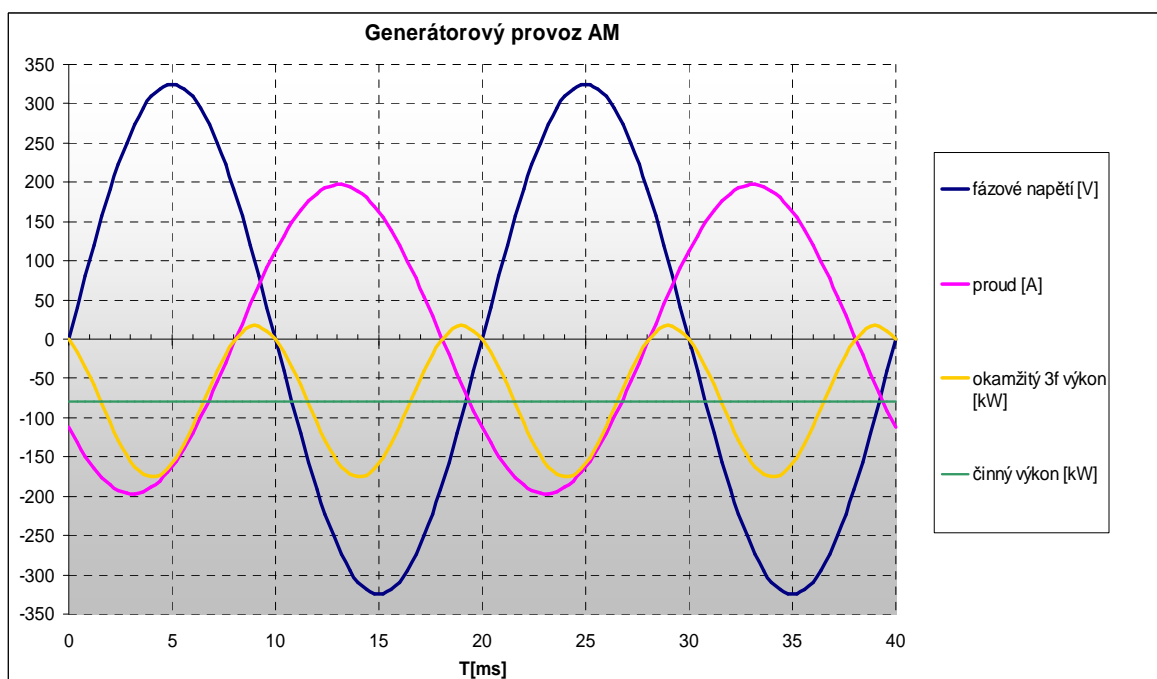
Obr. 2.5 zachycuje stav elektrických veličin zkoumaného motoru při zatížení momentem 500Nm.

- Proud je posunutý o $34,52^\circ$ za napětím.
- $\cos \varphi = 0,824$
- Činný výkon je 79kW.

Dosazením hodnot do vztahů (2.4) a (2.5) , které orientačně odečteme z **Obr. 2.5** zjistíme hodnotu zdánlivého a jalového výkonu.

$$S = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{|U_{\max}|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_{\max}|}{\sqrt{2}} = 3 \cdot \frac{325 \cdot 195}{2} = 95 \text{ kVA}$$

$$Q = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin 35^\circ = 3 \cdot \frac{325 \cdot 195}{2} \cdot 0,5735 = 55 \text{ kVar}$$



Obr.2.6 Průběh proudu a napětí AM 200kW při $s < 0$

Obr. 2.6 zachycuje stav elektrických veličin zkoumaného motoru při zatížení momentem o velikosti -500Nm. To znamená, že na rotor asynchronního motoru působí síla ve směru otáček tak, že se zvýší otáčky rotoru nad otáčky synchronní. Podle vztahu (2.3) zjistíme, že jsme se dostali do záporného skluzu. Potom asynchronní motor přechází do generátorového provozu a výkon teče směrem do sítě.

- Proud je zpožděný o $145,48^\circ$ za napětím.
- $\cos \varphi = -0,824$
- Činný výkon je -79kW.

Dosazením hodnot do vztahů (2.4) a (2.5) , které orientačně odečteme z **Obr. 2.6** zjistíme hodnotu zdánlivého a jalového výkonu.

$$S = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} = 3 \cdot \frac{|U_{\max}|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_{\max}|}{\sqrt{2}} = 3 \cdot \frac{325 \cdot 195}{2} = 95 \text{ kVA}$$

$$Q = 3 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin 145^\circ = 3 \cdot \frac{325 \cdot 195}{2} \cdot 0,5735 = 55 \text{ kVAr}$$

Z Obr.2.4, 2.5, 2.6 a jejich popisu je zřejmé že, proto aby se na satorovém vinutí samotného AG indukovalo napětí požadované úrovně, je pro vytvoření magnetického pole rotoru zapotřebí jalového výkonu (magnetizačního proudu).

Dalším důležitým poznatkem je ta skutečnost, že při změně zatížení generátoru se sice účinník mění v rozsahu téměř celého intervalu $\langle 0;1 \rangle$ ale jalový příkon zůstává konstantní.

Tato skutečnost jednoznačně vyvrací tvrzení (i uznávané odborné literatury) že, „pro vykompenzování jalové energie asynchronního generátoru v celém rozsahu výkonu je zapotřebí několikastupňová kompenzace“. Jako podklad pro toto konstatování je uváděna právě popsána závislost účinníku na zatížení generátoru.

2.5 Asynchronní generátor v ostrovní síti

Asynchronní generátor není schopen samostatné výroby elektrické energie ale obdobně jako synchronní generátor pro svoji funkci potřebuje buzení, tak asynchronní generátor pro svoji funkci potřebuje jalovou energii.

Představíme-li si asynchronní motor a připustíme možnost výskytu remanentního magnetismu v jeho rotoru můžeme předpokládat, že se bude po jeho roztočení na svorkách satorového vinutí indukovat „malé napětí“.

Protože pro nabuzení už roztočeného motoru potřebujeme magnetizační proud, a máme k dispozici „malé napětí“ harmonického průběhu, můžeme je využít pro vytvoření budícího (magnetizačního) proudu. Naším zájmem je, aby vytvoření tohoto magnetizačního proudu bylo bezetržové. Tyto naše požadavky splňuje svými vlastnostmi kondenzátor. Jeho závislost proudu na napětí je popsána vztahem:

$$i = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (2.6)$$

i - Okamžitá hodnota proudu [A]

C - Kapacita kondenzátoru [F]

dU - Změna napětí [V]

dt - Časový úsek [s]

Okamžitá hodnota proudu tekoucího kondenzátorem je úměrná změně napětí v čase, kde je kapacita kondenzátoru konstantou úměrnosti. Připojíme-li tento kondenzátor ke svorkám satoru, začne jím protékat proud, který se bude podílet na vytvoření magnetického indukčního toku rotoru.

Pro stanovení vhodné kapacity kondenzátoru potřebujeme znát velikost magnetizačního proudu. Tu lze získat měřením na nezatíženém motoru. V našem případě použijeme údaje z **Obr. 2.4**, kde je maximální hodnota fázového proudu $115A$ a napětí $325V$. Pro přehlednost a případné praktické využití budeme počítat s jejich efektivní hodnotou :

$$I_{0ef} = \frac{I_{0max}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

$$I_{0ef} = \frac{115}{\sqrt{2}} = 81,3A$$

$$U_{ef} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

$$U_{ef} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230V$$

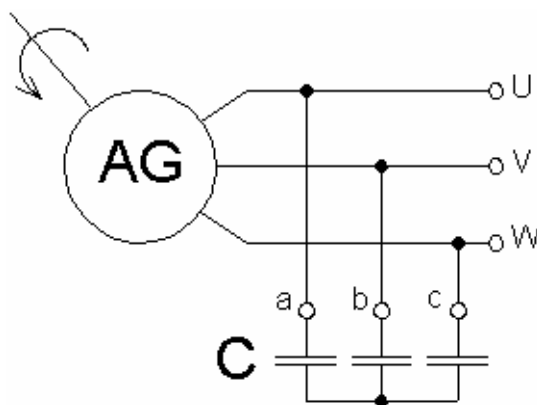
Proto abychom při napětí $230V$ dosáhli statorového proudu $81,3A$ je zapotřebí aby navržený kondenzátor vykazoval „kapacitní odpor“ X_C příslušné hodnoty.

$$X_C = \frac{U_{ef}}{I_{0ef}} \quad (2.9)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.10)$$

$$\frac{U_{ef}}{I_{0ef}} = \frac{1}{2\pi f C}$$

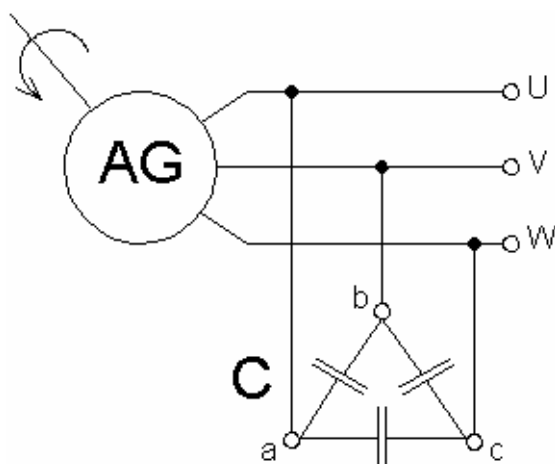
$$C = \frac{I_{0ef}}{2\pi f U_{ef}} \quad ; \quad C = \frac{81,3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 230} = 1,125 \cdot 10^{-3} F \quad (2.11)$$



Obr.2.7 Buzení asynchronního generátoru kondenzátory v zapojení Y

Nyní známe vztah pro výpočet kapacity kondenzátoru potřebného pro nabuzení asynchronního generátoru. Kondenzátor vypočtené kapacity je nutné připojit ke všem třem fázím generátoru. Protože v praxi se používají kondenzátorové baterie zapojené do trojúhelníku, provedeme transfiguraci z Y na D. V případě všech stejných kondenzátorů platí:

$$C_{ab} = \frac{C}{3} \quad (2.12)$$



Obr.2.8 Buzení asynchronního generátoru kondenzátory v zapojení D

Na základě znalostí výše uvedených vztahů odvodíme přímý výpočet kapacity kondenzátorové baterie:

$$C_{\Delta} = \frac{I_{0ef}}{3 \cdot \omega \cdot U_{ef}} \quad (2.13)$$

kde $\omega = 2\pi \cdot f$ (2.14)

potom $C_{ab} = \frac{1,125 \cdot 10^{-3}}{3} = 0,375 \cdot 10^{-3} F$

Pro buzení asynchronních generátorů jsou vhodné standardně vyráběné kompenzační kondenzátory viz. **Tab. 2.1**.

Tab.2.2 Tabulka kompenzačních kondenzátorů z produkce ZEZ Silko[8]Three-Phase Capacitors 400 V AC, 50 Hz, MKP dry,
delta connectionTřífázové kondenzátory 400 V AC, 50 Hz, MKP suché,
zapojení do trojúhelníku

Type Typ	Output Výkon Q_N [kvar]	Current Proud I_N [A]	Capacitance Kapacita C_N μ	Dimensions Rozměry Ø D x H [mm]	Weight Hmotnost [kg]	Protection degree Stupeň krytí	Drawing Výkres
CSADG 1-0,4/1	1,00	1,4	3 x 6,6	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/1,5	1,50	2,2	3 x 9,9	85 x 175	0,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/2	2,00	2,9	3 x 13,3	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/2,5	2,50	3,6	3 x 16,6	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/3,15	3,15	4,5	3 x 20,9	85 x 175	0,7	IP20	1
CSADG 1-0,4/4	4,00	5,8	3 x 26,5	85 x 175	0,8	IP20	1
CSADG 1-0,4/5	5,00	7,2	3 x 33,2	85 x 175	0,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/6,25	6,25	9,0	3 x 41,4	85 x 175	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/8	8,00	11,5	3 x 53,1	85 x 245	1,0	IP20	1
CSADG 1-0,4/10	10,00	14,4	3 x 66,3	85 x 245	1,1	IP20	1
CSADG 1-0,4/12,5	12,50	18,0	3 x 82,9	85 x 245	1,2	IP20	1
CSADG 1-0,4/15	15,00	21,7	3 x 99,5	110 x 245	1,6	IP20	1
CSADG 1-0,4/20	20,00	28,9	3 x 132,6	110 x 245	1,9	IP20	1
CSADG 1-0,4/25	25,00	36,1	3 x 165,8	110 x 245	2,1	IP20	1
CSADG 3-0,4/30	30,00	43,3	3 x 198,9	136 x 220	3,3	IP20	1
CSADG 3-0,4/33,3	33,30	48,1	3 x 220,8	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/37,5	37,50	54,1	3 x 248,7	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADG 3-0,4/40	40,00	57,7	3 x 265,3	136 x 261	4,0	IP20	2
CSADP 3-0,4/50	50,00	72,2	3 x 331,6	136 x 355	5,5	IP20	2

Pomocí tabulky **Tab.2.2** můžeme nyní přesně vytypovat sestavu kondenzátorové baterie potřebné pro vytvoření magnetizačního proudu asynchronního generátoru. V našem případě pro generátor o výkonu 200kW bude zapotřebí:

CSADG 1 – 0,4/25 o kapacitě 3 x 165,8μF a výkonu 25 kvar

CSADG 3 – 0,4/30 o kapacitě 3 x 198,9μF a výkonu 30 kvar

Celková hodnota: **3 x 364,7μF a výkonu 55 kvar**

Při znalosti jalového výkonu a napětí nezátíženého asynchronního generátoru lze z katalogu kondenzátorovou baterii vytypovat přímo bez nutnosti výpočtu kapacity.

Paralelním spojením asynchronního motoru s kondenzátorovou baterií dostaneme asynchronní generátor využitelný i pro napájení izolovaných (ostrovních) sítí. V praxi se může stát, že je hodnota remanentního magnetismu rotoru AG na tak nízké úrovni, že při jeho roztočení nedojde k vybuzení magnetického toku. Tento stav se řeší buď krátkodobým připojením větší kondenzátorové baterie nebo přetočením generátoru do nadsynchronních otáček.

3 NAPÁJENÍ OSTROVNÍ SÍTĚ ASYNCHRONNÍM GENERÁTOREM

3.1 Ostrovní síť s instalovaným výkonem jednotek kilowattů

Pro napájení malých ostrovních sítí jsou nejčastěji používány malé jednofázové a třífázové elektrocentrály. Obvykle se jedná o asynchronní generátor poháněný spalovacím, benzínovým, naftovým nebo plynovým motorem. Potřebné otáčky jsou udržovány otáčkovým regulátorem spalovacího motoru. Asynchronní generátor, tak jak je popsán v kapitole 2.3 má zatěžovací charakteristiku podobnou derivačnímu dynamu (má měkkou charakteristiku a je zkratuvzdorný). Aby se parametry dodávané energie udržely v mezích doporučené tolerance při různém typu zátěže, bývají tyto generátory vybaveny elektronickými regulátory napětí nebo jsou jinak konstrukčně upravovány. Pro výkony nad 20kW už jsou používány téměř výhradně generátory synchronní.

Další využití malých asynchronních generátorů je v obnovitelných zdrojích energie, kde jako generátory větrných turbín dodávají energii do odporových zátěží za účelem výroby tepla.

3.2 Ostrovní síť s instalovaným výkonem stovek kilowattů

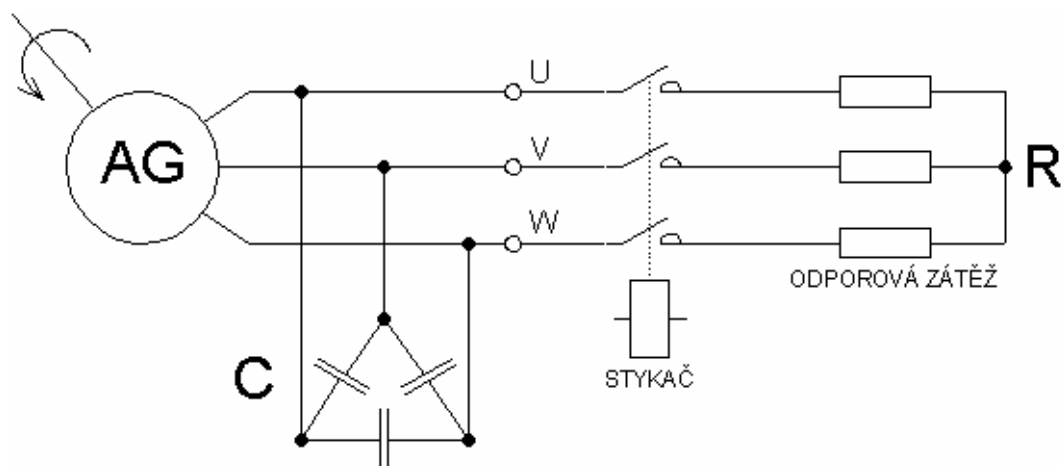
Napájení ostrovních sítí těchto výkonů obvykle není závislé na jediném zdroji. Do těchto sítí pracuje vždy více vzájemně nezávislých zdrojů, které jsou schopny operativně regulovat svůj výkon a tím držet odběr i dodávku energie v rovnováze. Jiná situace nastává v okamžiku poruchy vedoucí k rozpadu elektrizační sítě, tzv. „blackoutu“. Poté je nutné postupné připojování zdrojů i zátěží tak, aby byla v každém okamžiku udržena jejich rovnováha. Jako první mohou napájet lokální síť pouze zdrojová soustrojí se schopností startu do tmy, nebo ty, které po odpojení od sítě zůstaly v režimu napájení vlastní spotřeby. Technicky nic nebrání tomu, aby zdroje s asynchronními generátory velkých výkonů v řádu MW, mezi které patří hlavně velké větrné elektrárny, najížděly do tmy a napájely lokální ostrovní síť.

V naší elektrizační soustavě je řešení situace jako je „blackout“ plně v kompetenci provozovatelů distribučních sítí, proto spouštění asynchronních generátorů do tmy má velmi omezený lokální význam. Také vzhledem ke zkušenostem s velmi kvalitní a spolehlivou energetickou sítí se tento problém většinou neřeší. Zajištění napájení důležitých zařízení je v těchto případech ošetřeno právě samostatnými elektrocentrálami, které bývají osazeny i asynchronními generátory.

4 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ PROVOZU ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ

4.1 Pasivní budicí systémy asynchronních generátorů

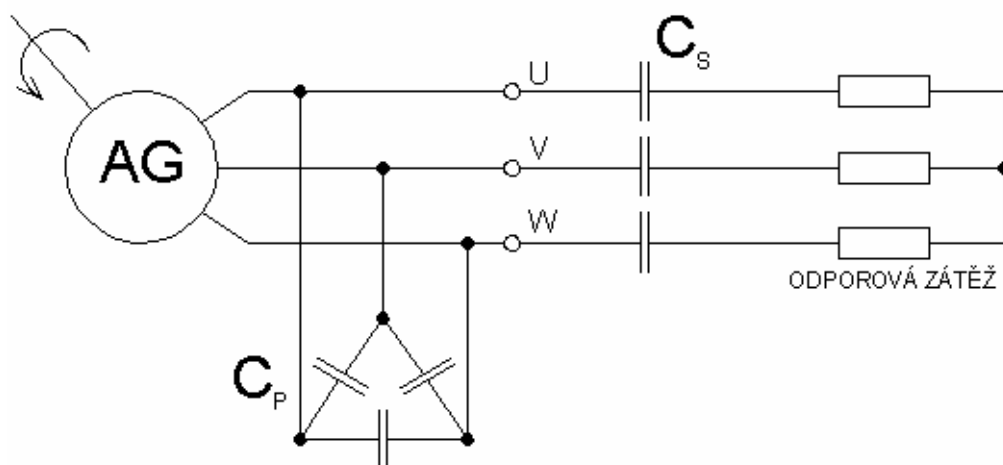
Z pohledu této práce je za pasivní budicí systém asynchronního generátoru považováno takové zařízení nebo soubor zařízení které neobsahuje žádné řízené ani řiditelné výkonové polovodičové prvky. Jako první příklad, **Obr. 4.1** je uvedeno buzení pevnou kondenzátorovou baterií.



Obr.4.1 Asynchronní generátor buzený pevnou kondenzátorovou baterií

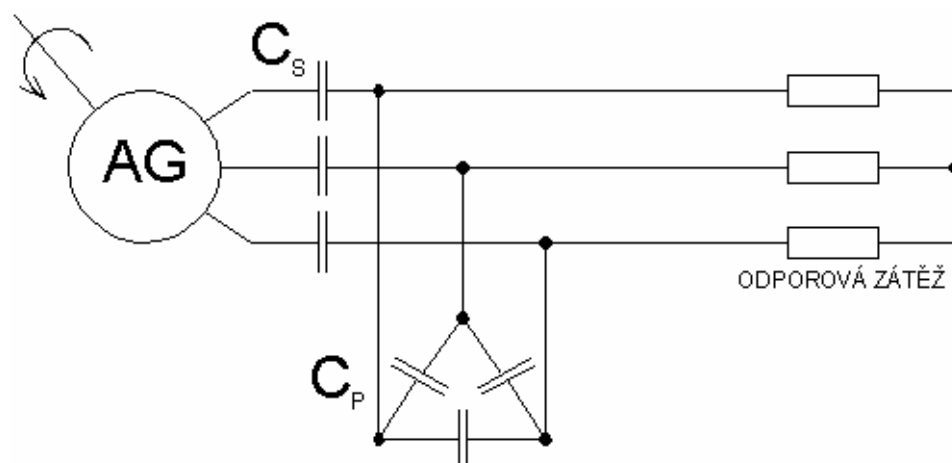
Toto zapojení se používá pro napájení konstantní známé odporové zátěže. Při změně kroutícího momentu na hřídeli generátoru se mění jak frekvence, tak svorkové napětí. Zátěž se musí připínat až po roztočení a nabuzení generátoru. Při poklesu otáček (frekvence) pod určitou mez dojde k odbuzení generátoru a náhlému odlehčení, které může být příčinou roztočení generátoru do průběžných otáček.

Aby se zamezilo možnosti náhlého odlehčení generátoru, používá se u AG malých větrných elektráren trvalé připojení zátěže přes sériové kondenzátory **Obr. 4.2**. Odporová zátěž je většinou tvořena topným tělesem pro ohřev teplé užitkové vody.



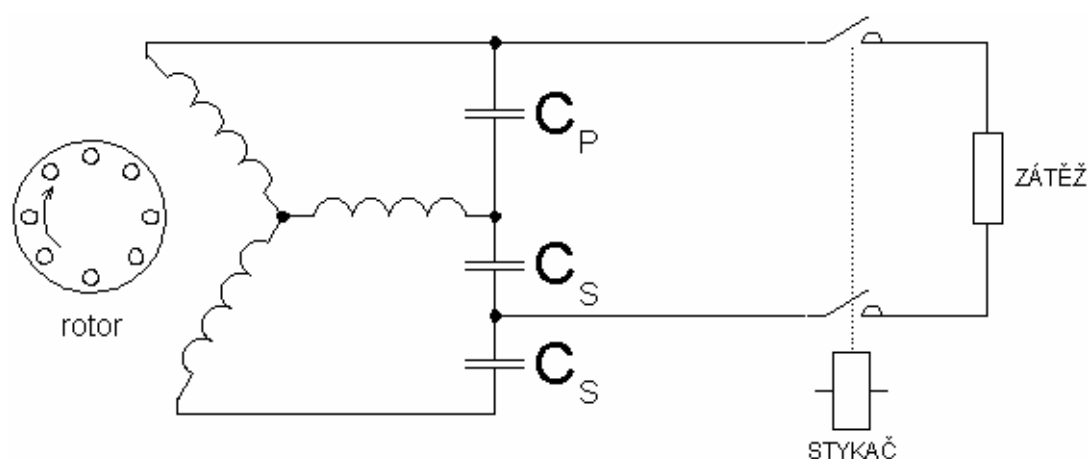
Obr.4.2 Zapojení zátěže AG přes kondenzátory

Toto zapojení je z hlediska použití na větrných elektrárnách výhodné pro příznivý průběh otáčkové - momentové charakteristiky, která odpovídá charakteristice větrné turbíny. V dostupné literatuře [9],[10] je uvedeno i zapojení viz. **Obr. 4.3**, kde jsou sériové kondenzátory zapojeny už před paralelní baterií C_p . Pro nabuzení AG bude toto zapojení pravděpodobně vyžadovat vyšší kapacitu použitých kondenzátorů.

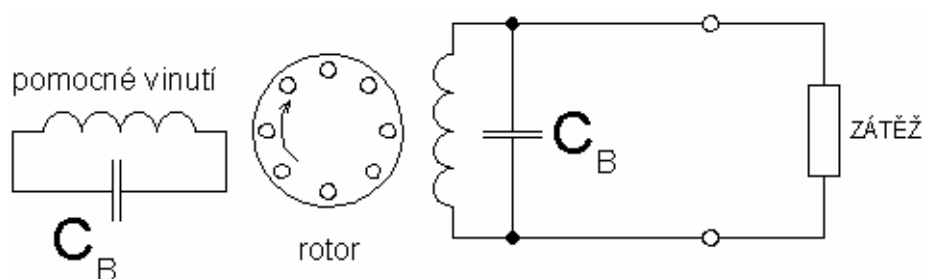


Obr.4.3 Zapojení zátěže AG i budící baterie přes sériové kondenzátory

Pro napájení jednofázové zátěže lze při použití 3f. generátoru využít zapojení z **Obr.4.4**. Nejmenší levné elektrocentrály mívají obvykle speciální jednofázové AG s odděleným budícím vinutím. Toto zapojení je znázorněno na **Obr. 4.5**.



Obr.4.4 Zapojení jednofázové zátěže na 3f. AG

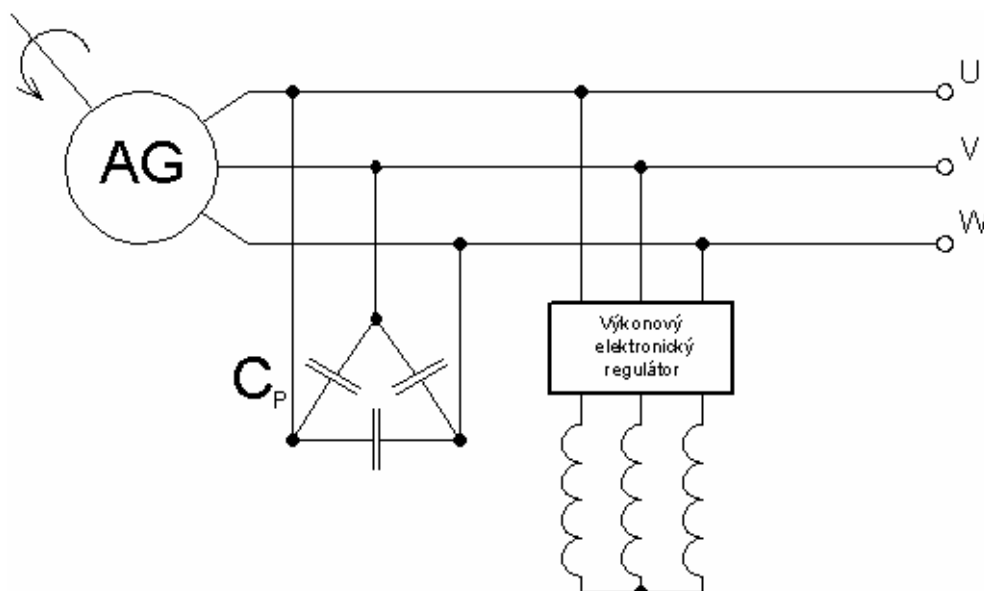


Obr.4.5 Zapojení speciálního jednofázového AG

4.2 Aktivní budicí systémy asynchronních generátorů

Následující kapitola je věnována oblasti použití elektronicky řízených asynchronních generátorů. Oproti v kapitole 4.1 zmíněných způsobů buzení AG se níže uvedené příklady vyznačují možností regulace výstupního napětí nebo frekvence a napětí.

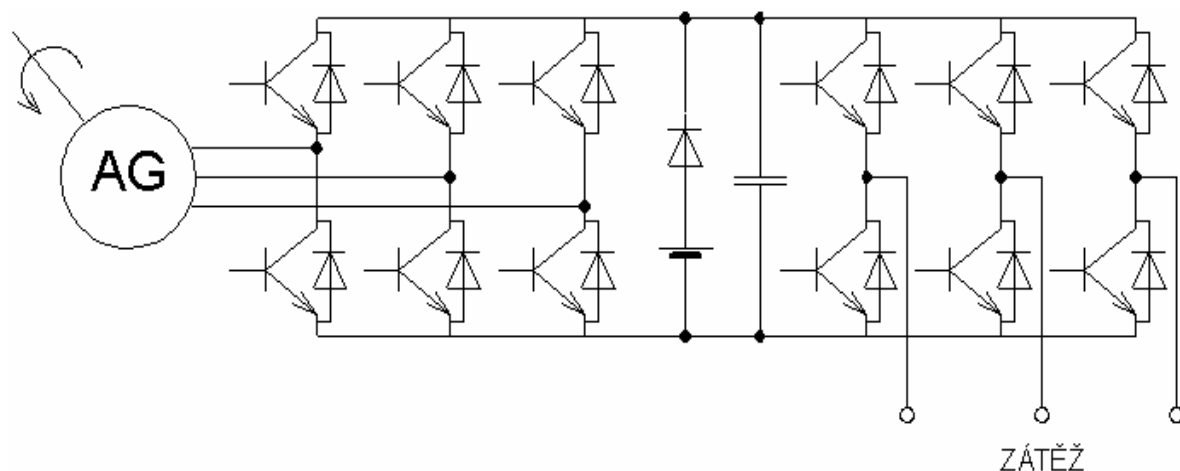
Jako první příklad **Obr. 4.6** je uveden AG buzený z kondenzátorové baterie, která má podstatně větší kapacitu než by bylo pro nabuzení zapotřebí. Po dosažení požadovaného napětí na svorkách generátoru je přebytečný magnetizační proud z kondenzátorové baterie řízeně odváděn do indukčnosti mimo statorové vinutí generátoru. V případě připojení zátěže induktivního charakteru elektronický regulátor vyřazuje paralelní indukčnost a tím je udržováno konstantní svorkové napětí AG. Protože se pro regulaci proudu indukčnostmi obvykle používá fázové řízení, bývá výstupní harmonické napětí deformováno. První nabuzení generátoru lze provést pouze bez připojené zátěže.



Obr.4.6 Zapojení AG s regulací výstupního napětí

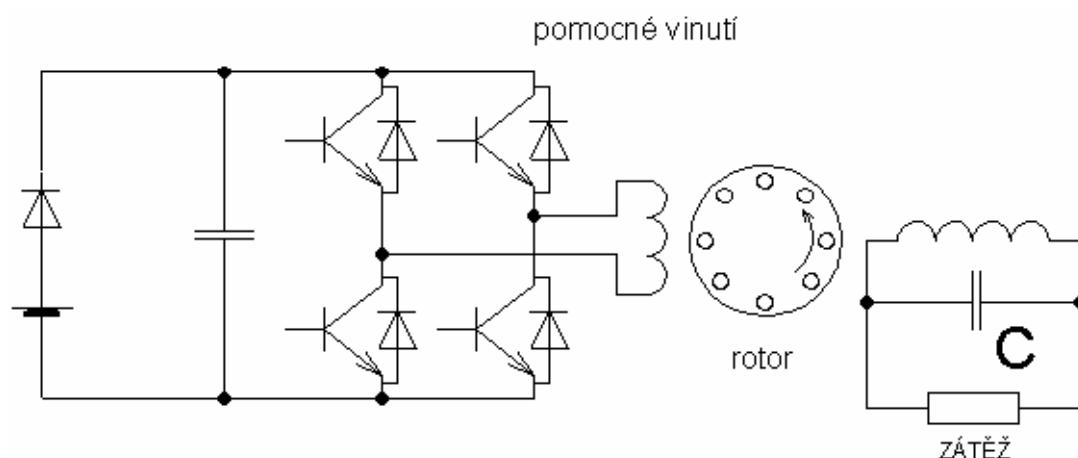
Nedostatky popsaného buzení odstraňuje AG připojený k síti nebo ke spotřebiči prostřednictvím plně řízeného čtyřkvadrantového PWM měniče. Pro možnost najetí generátoru do tmy nebo přímo do zátěže ostrovní sítě je zapotřebí počáteční napájení do stejnosměrného meziobvodu. Toto napájení je znázorněno na **Obr. 4.7** akumulátorovou baterií oddělenou diodou. Takto koncipované zapojení asynchronního generátoru umožňuje udržovat v připojené síti konstantní frekvenci i napětí. Měnič umožňuje provozování asynchronního stroje jak v motorickém, tak generátorovém režimu. Této vlastnosti je využíváno při stavbě nových vodních elektráren osazených neregulovanými čerpadly v turbínovém provozu. Díky plnému řízení generátoru mohou tyto elektrárny pracovat i jako přečerpávací.

Při výpočtu efektivity použití čtyřkvadrantového řízení čerpadla v turbínovém provozu je třeba si uvědomit, že turbína (čerpadlo v turbínovém provozu) má při všech otáčkách téměř konstantní kroutící moment. To znamená, že výkonové ztráty měniče budou stejné jak při malém výkonu tak při výkonu maximálním.



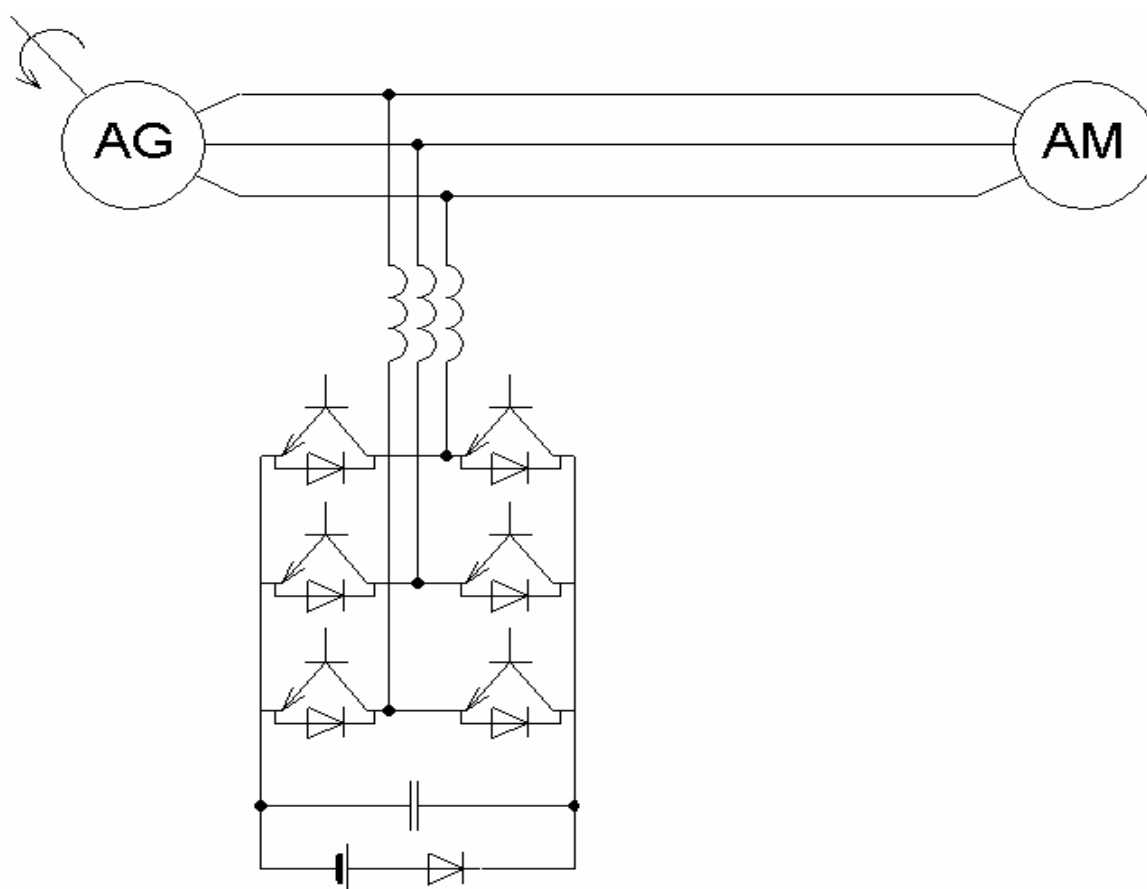
Obr.4.7 Zapojení AG se čtyřkvadrantovým měničem

Zapojení elektronického řízení jednofázového AG s odděleným budicím vinutím znázorňuje **Obr. 4.8.**



Obr.4.8 Zapojení jednofázového AG s el. řízením budicího proudu

Principiální schéma buzení AG znázorněné na **Obr. 4.9** se uplatňuje především v automobilovém průmyslu, kde je pohonná jednotka tvořena elektronicky řízeným asynchronním motorem, který v době brzdění nebo využívání nadbytečné energie spalovacího motoru hybridních automobilů, pracuje ve funkci generátoru a dodává energii zpět do akumulátorů.



Obr.4.9 Asynchronní generátor buzený PWM ve spolupráci s AM

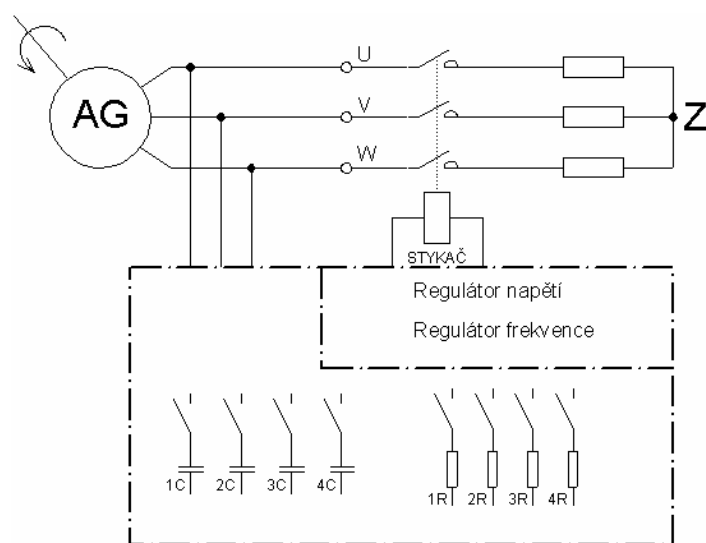
5 STATICKÁ BUDICÍ JEDNOTKA ASYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

5.1 Blokový návrh statické budicí jednotky AG

Návrh koncepce řízení asynchronního generátoru v ostrovní síti s instalovaným výkonem odpovídajícím výkonu generátoru vychází z požadavků na docílení rovnocenné zálohy distribuční sítě pro lokality, ve kterých je tento zdroj k dispozici. V praxi jsou to zejména vodní elektrárny o výkonech od jednotek do stovek kW i výše zmíněné větrné elektrárny a kogenerační jednotky.

Základním požadavkem na kvalitu dodávané energie je dodržení napětí a frekvence v přípustných mezích. Kvalitu dodávané energie řeší normy ČSN EN 50 160 a ČSN EN 50 438.

Protože většina zdrojů pracujících paralelně s distribuční sítí nemá dostatečně dynamický regulátor otáček, je nutné v případě ostrovního provozu operativně řídit činnou zátěž tak, aby svorkové napětí generátoru nevybočilo z povolených limitů. Udržování frekvence v přesných mezích nemá pro běžné spotřebiče podstatný význam ale z hlediska účinného využití energetického potenciálu zdroje, je vhodné frekvenci dodržovat v mezích cca 5%. Návrh kondenzátorové baterie, tak jak je znázorněno na **Obr. 5.1** umožňuje postupné připojování budicí kapacity v 15 výkonových úrovních (řízení frekvence). Obdobně je řešeno i řízení činné zátěže (řízení napětí).



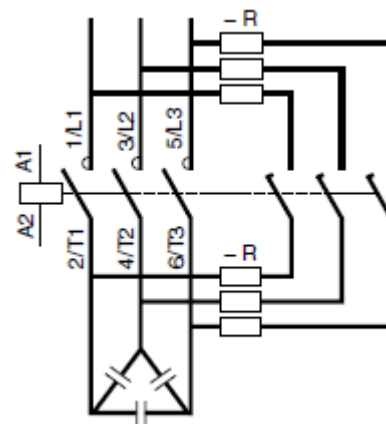
Obr.5.1 Blokový návrh řízení AG

5.2 Konstrukční řešení budicí jednotky

Konkrétní technické řešení budicí jednotky vychází z několika požadavků:

- konstrukčně co možná nejjednodušší a ekonomicky nenáročné řešení,
- použitelnost pro generátory v rozsahu výkonů od 5 do 200kW,
- schopnost rychlé reakce na změny zatížení,
- mobilní konstrukce.

S přihlédnutím k požadavku na dynamiku řízení kondenzátorové baterie se nabízí možnost využití polovodičových výkonových bloků určených pro spínání kondenzátorů. Použití polovodičového připojování kondenzátorů sebou přináší některé další nežádoucí jevy, které jsou blíže popsány na internetových stránkách výrobce www.kmb.cz, navíc jejich cena a hmotnost vedla k rozhodnutí, tyto polovodičové spínací bloky neaplikovat. Při použití speciálních stykačů určených ke spínání kondenzátorů je reakce řízení kondenzátorové baterie limitována opakovatelností sepnutí jednotlivých stykačů. Tyto stykače jsou vybaveny pomocnými kontakty, které v předstihu spínají tlumící odpory. Díky použitým předkontaktům a tlumícím odporům nedochází k napalování hlavních kontaktů až do proudu rovnajícímu se 200 násobku jmenovitého pracovního proudu. Výrobce uvádí maximální frekvenci sepnutí stykače 240 /hodinu, což odpovídá požadavku minimální prodlevy mezi opakovaným sepnutím 15s. Zapojení tohoto stykače je na **Obr.5.2** [11]



Obr.5.2 Stykač LC1DPK12 pro spínání kondenzátorových baterií[11]

6 KONSTRUKCE BUDICÍ JEDNOTKY AG

6.1 Výkonová část

Zapojení výkonové části budicí jednotky vychází z blokového návrhu **Obr. 5.1**, obsahuje silové vedení, z něhož jsou v paralelních větvích připojeny kondenzátory a stykače odporové zátěže společně s příslušným jištěním. Měřicí transformátory proudu jsou zapojeny tak, aby z nich bylo možno vyhodnotit velikost jalového výkonu zapojeného generátoru a tuto informaci využít pro řízení kondenzátorové baterie. Zapojení výkonové části statické budicí jednotky je na **Obr. 6.1**.

Kondenzátorová baterie byla sestavena tak, aby bylo dosaženo hodnoty minimálního regulačního zásahu přibližně 1,5 kvar při napětí 440V.

Sestava kondenzátorové baterie:

C1	-	1,5kvar	C2	-	3,15kvar
C3	-	6,25kvar	C4	-	12,5kvar
C5	-	25kvar	C6	-	25kvar

umožňuje téměř plynulé řízení jalového výkonu v intervalu od 0 do 48,4kvar s časovým omezením opětovného sepnutí stykače kompenzace 15s. Pro generátory větších výkonů nebo pro případ připojení induktivní zátěže je v záloze ponechán kondenzátor C6. Tento kondenzátor může být využit i jako rezerva pro rychlé doplnění jalového výkonu pokud budou nižší stupně blokovány ochranným intervalem opětovného zapnutí.

Obdobně bude řízena i činná zátěž sestavená z třífázových topných těles o výkonech:

ET1	-	1,5kW	ET2	-	3kW
ET3	-	6kW	ET4	-	12kW.

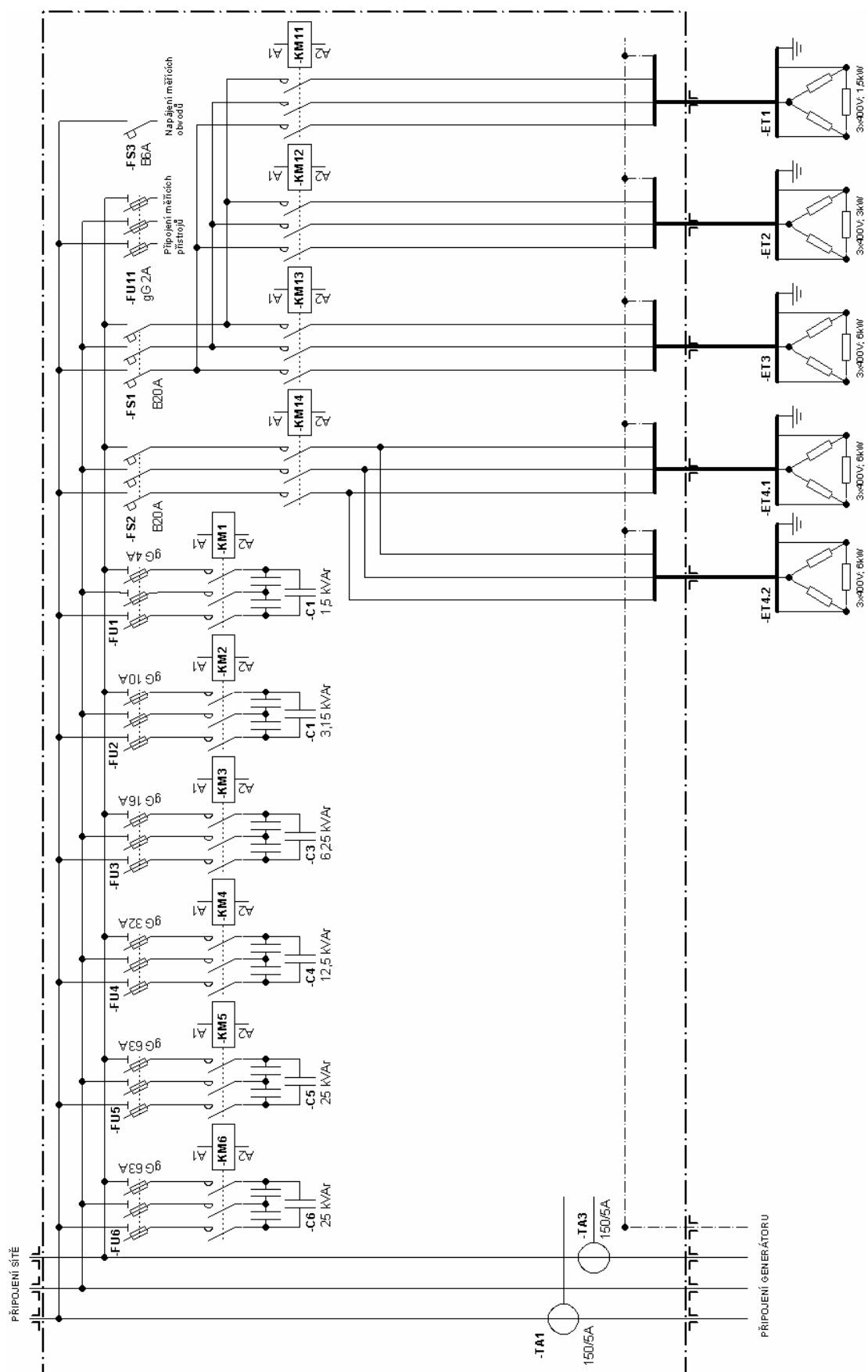
Výkon topných těles je možno řídit v intervalu 0 až 22,5kW. Protože frekvence spínání činné zátěže není nijak výrazně časově omezena, využijí ji i pro vymezení regulačního pásma napětí generátoru. To znamená, že nad regulační smyčkou řízení frekvence je vytvořena nadřazená regulační smyčka napětí s velkým pásmem necitlivosti. Za normálních podmínek v ustáleném stavu, nebo při pomalých změnách zátěže generátoru je výstupní napětí řízeno spínáním příslušného stupně kondenzátorové baterie.

Při orientační analýze záměrně vneseného zpoždění opakovaného sepnutí kondenzátoru se dá předpokládat pomalejší reakce budicí jednotky pouze na požadavek zvýšení napětí generátoru. Tato pomalejší reakce může příznivě ovlivnit odolnost celé regulační soustavy proti rozkmitání. Pokud bude správně navržena derivační konstanta regulátoru, pak by měl regulátor, při náhlém jalovém zatížení generátoru, upravit velikost připojené kondenzátorové baterie pouze na jediný zásah. Naopak při náhlém jalovém odlehčení se kondenzátory odpínají bez zpoždění. Pouze v případě rychlých změn jalového zatížení generátoru může dojít k postupnému snižování jeho výstupního napětí až pod limitní mez hlídanou regulátorem frekvence. V případě dosažení stanovené spodní meze svorkového napětí generátoru, uplatní se prioritní požadavek na snížení zátěže (nebo na zvýšení výkonu pohonné jednotky), čímž se zvýší otáčky (frekvence) generátoru a napětí vzroste. Při zvyšující se frekvenci roste budicími kondenzátory právě ten proud, který se podílí na buzení asynchronního generátoru. Velikost tohoto proudu je vyjádřena vztahem:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (6.1)$$

$$I_c = \frac{U}{X_c} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f C}} = U \cdot 2\pi f C$$

Konečná závislost mezi napětím na generátoru, velikostí kompenzační baterie a frekvencí je analyzována na základě měření na generátorech různých výkonů.



Obr.6.1 Zapojení výkonové části budicí jednotky

6.2 Řídicí část budicí jednotky

Protože jsou veškeré výkonové prvky ovládané napětím 230V AC je řídicí část napájena ze zálohovaného zdroje 230V, 650VA. Tento zálohovaný zdroj střídavého napětí umožňuje sepnutí stykačů kondenzátorových baterií ještě v době, kdy na generátoru není napětí. Napájení 230V AC má i použitý analyzátor sítě DMK 32 od f. LOVATO. Zálohované napájení nám zajistí spolehlivou funkci měřících převodníků a řídicího PLC i v době ladění, kdy není možno zaručit stabilitu řízeného svorkového napětí generátoru. Také nám umožní zkoušení generátorů bez vyvedeného uzlu.

Pro řízení budicí jednotky jsem zvolil malý programovatelný automat MITSUBISHI ALFA2. Již základní verze tohoto malého PLC obsahuje 9 releových výstupů, 8 analogových a 7 binárních vstupů. Na jeho čelní straně je čtyřřádkový displej s osmi programově využitelnými tlačítky. PLC, převodník napětí, převodník jalového výkonu i převodník frekvence jsou napájeny ze zdroje 24V DC. Převod měřících transformátorů proudu je 150/5A.

Monitorování funkce celé budicí jednotky je zajištěno multimetrem DMK 32 z produkce italské firmy LOVATO. DMK 32 snímá 47 veličin, které je možno přes sériové galvanicky oddělené rozhraní RS 485 protokolem Modbus RTU s dostatečnou rychlostí zaznamenávat prostřednictvím software, který je standardním příslušenstvím přístroje. Na čelní straně přístroje je membránová klávesnice a 5 samostatných displejů. Přístroj umožňuje provádět i harmonickou analýzu až do 23 harmonické.

Další analogové převodníky napětí, jalového výkonu a frekvence jsou výrobky české firmy Rawet Blansko. Protože analyzátor sítě neumí zaznamenávat frekvenci mimo meze 45 až 65 Hz je statická budicí jednotka vybavena jednoduchým snímačem síťové frekvence s elektrickým oddělením obvodů prostřednictvím optočlenu. Snímaná frekvence je upravena na obdélníkový signál s amplitudou 24V. Měření frekvence je zajištěno řídicím PLC, který je rozšířen o jednotku rychlých vstupů. Z tohoto důvodu budou, do automaticky pořízeného záznamu z analyzátoru sítě v intervalu mimo (45; 65)Hz, údaje o frekvenci doplněny ručně.

S ohledem na prostorové využití rozváděče jsou měřící převodníky, analyzátor sítě i PLC umístěny na jeho dveřích. Všechny kabelové spoje jsou vyvedeny v horní stěně skříně přes plastové průchodky zajišťující krytí IP55. Schéma zapojení je uvedeno na **Obr.6.1** a **Obr.6.3**. Pohled na sestavenou budicí jednotku je na **Obr.6.2**.

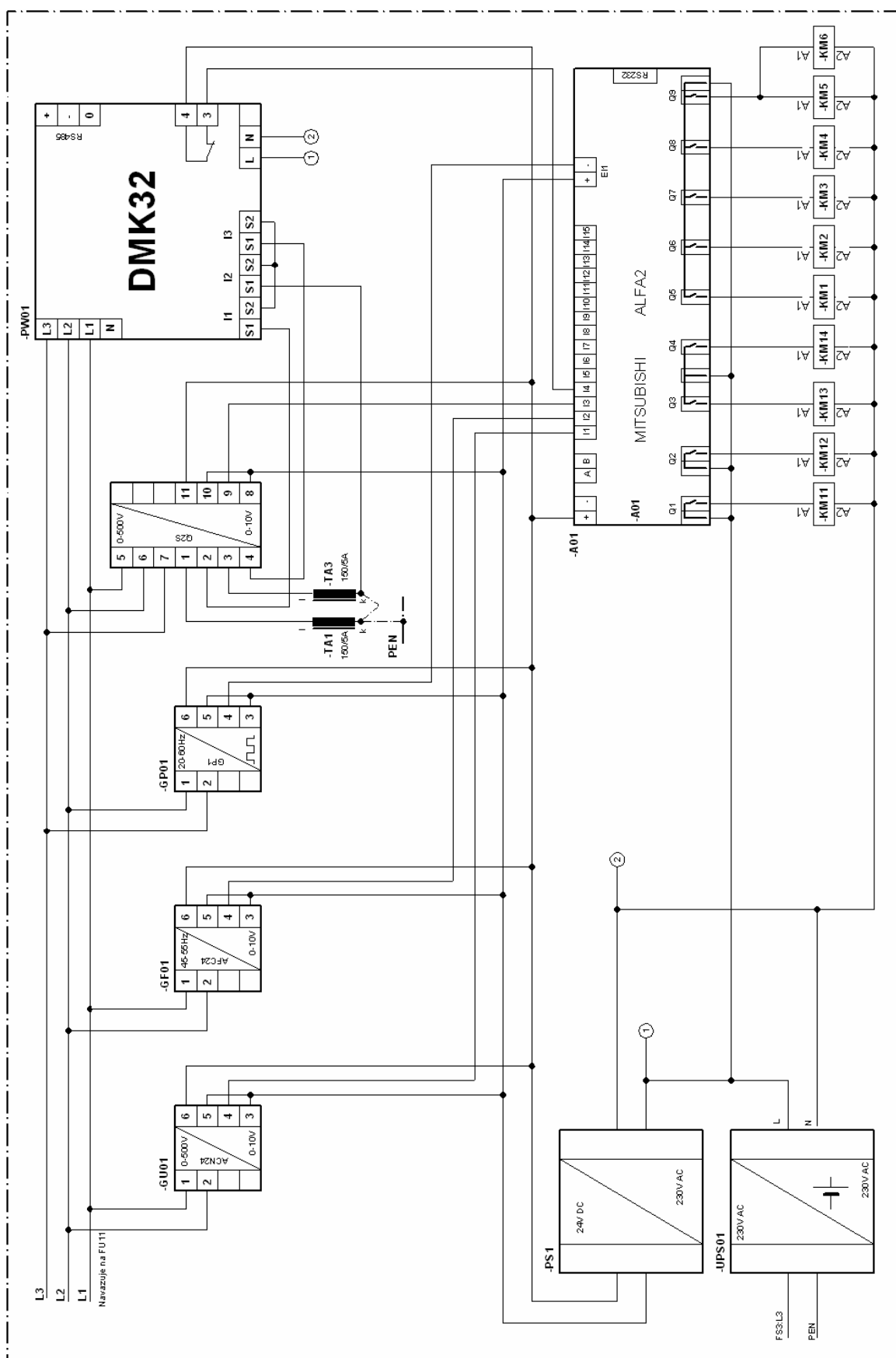


a)



b)

Obr.6.2 Sestavená statická budicí jednotka AG



Na **Obr.6.2b** je vedle budicí jednotky plastový sud s topnými tělesy, sloužící pro maření výkonu testovaného generátoru.

6.3 Nastavení budicí jednotky

Pro první nastavení budicí jednotky jsem zvolil pro řízení frekvence i napětí proporcionální regulátory. Regulační zásah 100% napěťového regulátoru (kondenzátorové baterie) odpovídá odchylce 25V od žádané hodnoty. Každému výstupu pro ovládání jednotlivého stupně kondenzátorové baterie je přiřazen ochranný obvod bránící jeho sepnutí dříve než 15s po vypnutí. 100% zásah regulátoru frekvence odpovídá odchylce 10Hz od žádané hodnoty. Ochranný interval četnosti spínání stykačů zátěže je dán rychlostí regulační smyčky, která je nastavena na 0,3s.

Mimo automatický provoz budicí jednotky AG, který je možno parametrizovat přímo z čelního panelu PLC, je umožněno i manuální ovládání. Stiskem tlačítka + nebo - je možno zvyšovat či snižovat zátěž generátoru. Tlačítka šipek lze obdobně zvyšovat či snižovat kapacitu připojené kondenzátorové baterie. Ochranná funkce při zvýšení napětí nad 253V , kdy je připojena maximální zátěž, je trvale aktivní.

6.4 Vybrané elektrické parametry budicí jednotky

Protože způsob použití budicí jednotky u zdrojových soustrojí, u kterých není možno zajistit opakovatelnost stejných podmínek, nezaručuje věrohodnost naměřených údajů, jsem známé hodnoty statické budicí jednotky z naměřených údajů zpětně dopočítal a vzájemně porovnal.

Odchylka vypočtených hodnot od hodnot skutečných je indikátorem věrohodnosti provedeného měření. Známé parametry statické budicí jednotky jsou uvedeny v **Tab.6.1**. Přesnost kondenzátorů se může pohybovat, dle katalogového údaje výrobce, v rozmezí od -5% do +10% udávané kapacity. Výrobní tolerance topných těles využitých jako činná zátěž není udávána.

Protože jsou analyzátorem sítě DMK 32 měřeny všechny parametry jednofázově, je účelné pro zprehlednění výpočtů a vzájemných vztahů, přepočítat kondenzátory i odporovou zátěž tak, jako by byla zapojena proti uzlu zdroje. Ve skutečnosti jsou generátor, kondenzátory i zátěž zapojeny do trojúhelníku.

Provedl jsem transfiguraci třífázových kondenzátorů, které jsou zapojeny v trojúhelníku, na zapojení do hvězdy podle vztahu:

$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3} \quad ; \quad C_Y = 3 \cdot C_{\Delta} \quad (6.2)$$

Přepočtená kapacita je uvedena v **Tab.6.1** ve žlutě podbarveném sloupci. Obdobně jsem provedl transfiguraci odporové zátěže.

$$R_{\Delta} = 3 \cdot R_Y \quad ; \quad R_Y = \frac{R_{\Delta}}{3} \quad (6.3)$$

Přepočtená hodnota odporu zátěže je uvedena v **Tab.6.1** v modře podbarveném sloupci.

Tab.6.1 Parametry součástek statické budič jednotky

Kondenzátory				Odporová zátěž			
	Q [kvar] 440V	3 x C [uF] D	3 x C [uF] Y		P [kW] 400V	R [Ω] D	R [Ω] Y
C1	1,5	5,5	16,5	ET1	1,5	320	106,67
C2	3,15	17,3	51,9	ET2	3	160	53,33
C3	6,25	34,3	102,9	ET3	6	80	26,67
C4	12,5	68,5	205,5	ET4	12	40	13,33
C5, C6	25	137	411				

7 SIMULACE PROVOZU AG V OSTROVNÍ SÍTI SE SBJ

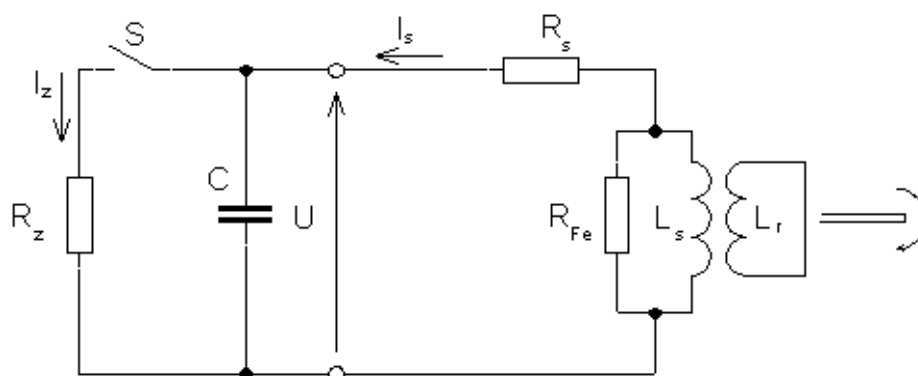
7.1 Matematický popis SEIG

Označení samobuzeného asynchronního generátoru v českém jazyce není běžné, proto je dále v textu používána výše uvedená anglická zkratka SEIG (Self-Excited Induction Generator). Na místo názvu „statická budič jednotka“ bude dále používána zkratka SBJ.

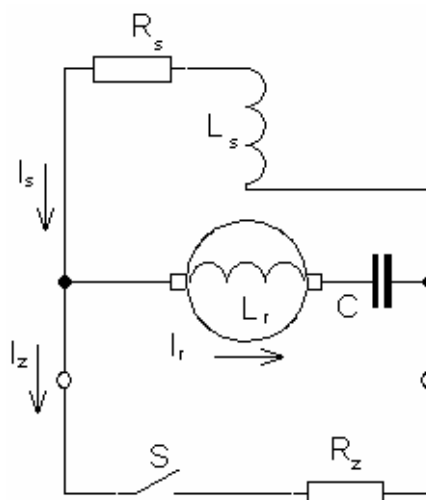
Věrohodný popis SEIG není jednoduchou záležitostí, je zapotřebí současně vypočítat mnoho vzájemně se ovlivňujících veličin. Vzájemné vazby těchto veličin nejsou lineární a jsou ovlivněny konstrukcí jednotlivých strojů. Aby se popis zjednodušil, často se vychází z ustáleného stavu, ve kterém je alespoň jedna veličina předem dána. Pro popis nelineárních magnetizačních charakteristik se používá tabulek.

Popis asynchronního stroje v obecném souřadném systému si vyžaduje podrobnou znalost mnoha parametrů a odladění tohoto modelu je vždy svázáno s konkrétním strojem. Tyto potřebné parametry nejsou z pouhého štítkového údaje asynchronního stroje zjistitelné, proto jsem pro potřeby simulace dynamického chování asynchronního generátoru v ostrovní síti vytvořil vlastní model, jednoduše aplikovatelný na jakýkoli generátor se znalostí pouze štítkových údajů.

Model dynamického chování asynchronního generátoru vychází z hlavních konstrukčních součástí asynchronního stroje se zanedbáním odporu rotorové klece, magnetizační charakteristiky magnetického obvodu, mechanických ztrát a ztrát v železe.



Obr.7.1 Schéma SEIG



Obr.7.2 Schéma SEIG přizpůsobené pro zjednodušený matematický popis

Aby se chování simulovaného stroje co nejvíce podobalo skutečnosti, budou ztráty v železe a mechanické ztráty, které se promítají na stranu rotoru, nahrazeny přídatnou odporovou zátěží. Tato přídatná zátěž přenesla ztráty na stranu statoru, což zkreslí statorový proud ale pro účely dynamického chování je toto nepodstatnou záležitostí. Dále prostý součet proudu zátěží a proudu kondenzátorem, které jsou ve skutečnosti fázově posunuty, je proveden pouze s ohledem na maximální zjednodušení popisu.

Základním poznatkem pro provedení zjednodušujícího popisu dle **Obr. 7.2** bylo experimentálně zjištěné chování SEIG obdobné derivačnímu dynamu. Při bližším zkoumání zjistíme, že vlivem remanentního magnetismu rotoru vznikne točivé magnetické pole, indukující ve statoru střídavé napětí. Díky připojenému kondenzátoru prochází statorovým vinutím magnetizační proud posunutý oproti napětí o 90° , který vyvolá zvýšení magnetického toku. Orientace tohoto toku je shodná s orientací remanentního magnetismu. Vzniklé magnetické pole rotorová cívka L_r nijak nepocituje, protože se otáčí stejnou rychlostí. Kdyby měla L_r nulový odpor, nebo kdyby generátor neměl žádné ztráty nedocházelo by ani ke vzniku skluzu. Z pohledu rotoru můžeme proud podílející se na vzniku magnetického pole považovat za stejnosměrný.

Dalším předpokladem zjednodušujícího výpočtu je přítomnost pouze jediné indukčnosti:

$$L_s = L_r$$

Základní rovnice popisující zjednodušený jednofázový model třífázového SEIG z **Obr.7.2**:

$$U = \omega \cdot L_r (I_r + I_0) - R_s \cdot (I_r + I_z) - L_s \cdot \frac{d(I_r + I_z)}{dt} \quad (7.1)$$

$$I_r = \omega \cdot C \cdot U + C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (7.2)$$

$$M_m = p_p \left(J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_i \right) \quad (7.3)$$

$$M_i = \frac{R_s \cdot (I_r + I_z)^2 + \frac{U^2}{R_z}}{1 + \omega} \quad (7.4)$$

Vnitřní elektrický moment je dopočítáván jako podíl činného výkonu a úhlové rychlosti. Konstanta 1 přičítána k úhlové rychlosti je uváděna pro ošetření hazardního stavu programu SIMULINK, kdy je úhlová rychlost rovna nule.

I_0 - proud představující remanentní magnetismus [A].

I_r - proud rotorem [A] .

I_s - proud statorem [A] .

M_m - mechanický moment [Nm] .

M_i - vnitřní elektrický moment [Nm] .

J - moment setrvačnosti soustrojí [kgm²] .

Úprava rovnic 7.1 až 7.3 pro potřeby programu SIMULINK.

$$I_r = \frac{1}{L_s} \cdot \int [\omega \cdot L_r \cdot (I_r + I_0) - U - R_s \cdot (I_r + I_z)] dt - I_z \quad (7.5)$$

$$U = \frac{1}{C} \cdot \int (I_r - \omega \cdot C \cdot U) dt \quad (7.6)$$

$$\omega = \frac{1}{J} \cdot \int \left(M_m - \frac{R_s \cdot (I_r + I_z)^2 + \frac{U^2}{R_z}}{1 + \omega} \right) dt \quad (7.7)$$

7.2 Parametrizace zjednodušeného modelu SEIG

Zjednodušený model SEIG aplikuji na asynchronní motor, který je k dispozici v laboratořích VUT. Následným měřením jeho skutečných parametrů při provozu v ostrovní síti ve spolupráci se statickou budicí jednotkou na dynamometru jsou prakticky ověřeny teoreticky získané předpoklady.

Parametry asynchronního motoru:

Výrobce:	SIEMENS	Výrobní číslo:	33157 6017
Typ:	1LA7133-4AA60	Izolace:	F (155°C)
Účinnost:	EFF2		
Frekvence:	50 Hz		60 Hz
Napětí:	400/690 V Δ/Y		460 V Δ
Proud:	15,2/8,8 A		14,7 A
Výkon:	7,5 kW		8,6 kW
Cos φ :	0,82		0,83
Otáčky:	1455/min.		1755/min.

Parametry dynamometru:

Výrobce:	VUES Brno
Typ:	DYNOFIT ASD 6,3k-4
Moment:	40 Nm (70 Nm)
Výkon:	6,3 kW
Otáčky:	1500/3000 min ⁻¹ (7000 min ⁻¹)

Statická budicí jednotka:

Typ:	SBJ1
Kondenzátorová baterie:	400 μ F/440V Δ
Minimální regulační stupeň:	5,5 μ F
Odporová zátěž:	22,5 kW /400V
Minimální regulační stupeň:	1,5 kW

Výpočet odporu vinutí jedné fáze R_s :

Udaná účinnost EFF2 odpovídá třídě účinnosti dle ČSN EN 600 34-30 IE1 a to je minimálně 86%. Dále budeme předpokládat 1/3 podíl ztrát v mědi statoru na celkových ztrátách.

$$\Delta P_j = \frac{P_n}{\eta} \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{1}{3} \quad (7.8)$$

$$\Delta P_j = \frac{7500}{86} \cdot (100 - 86) \cdot \frac{1}{3} = 407 W$$

Celkové ztráty v mědi statoru rozdělíme na jednotlivé fáze a z jmenovitého proudu dopočítáme odpor vinutí jedné fáze.

$$R_s = \frac{\Delta P_J}{3 \cdot I_n^2} = \frac{407}{3 \cdot 15,2^2} = 0,59 \Omega \quad (7.9)$$

Dále ze štítkových údajů dopočítáme potřebný magnetizační proud. Skutečný magnetizační proud bude ve skutečnosti nižší, protože ztráty v generátorovém provozu se projeví na straně rotoru. Výchozí hodnoty pro tento výpočet v sobě zahrnují i ztráty ze strany statoru, získaný výsledek obsahuje rezervu a proto by mělo být ve skutečnosti indukované napětí vyšší.

$$I_{0ef} = I_n \cdot \sin(\arccos \varphi) \\ I_{0ef} = 15,2 \cdot \sin(\arccos 0,82) = 8,67 A \quad (7.10)$$

Pro výpočet minimální dosažitelné frekvence, při které je generátor schopen samobuzení při použití maximální velikosti dostupné kondenzátorové baterie, použijeme známou velikost magnetizačního proudu a známou frekvenční závislost svorkového napětí generátoru.

$$I_{0ef} = \frac{U_f \cdot \frac{f_{\min}}{f_n}}{X_C} \\ f_{\min} = \sqrt{\frac{I_{0ef} \cdot f_n}{U_f \cdot 2\pi \cdot C_{\max Y}}} = \sqrt{\frac{8,7 \cdot 50}{230 \cdot 2\pi \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}} = 15,84 Hz \quad (7.11)$$

Sdružené napětí při této frekvenci bude:

$$U_{S(15Hz)} = U_{Sn} \cdot \frac{f_{\min}}{f_n} = 400 \cdot \frac{15,84}{50} = 127V \quad (7.12)$$

Maximální dosažitelné zatížení odporovou zátěží při tomto napětí bude:

$$P_{\max(127V)} = \frac{U_{S(15Hz)}^2}{U_{Sn}^2} \cdot P_{Z\max} = \frac{127^2}{400^2} \cdot 22500 = 2268W \quad (7.13)$$

Pro výpočet indukčnosti generátoru použijeme Thomsonův vzorec:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (7.14)$$

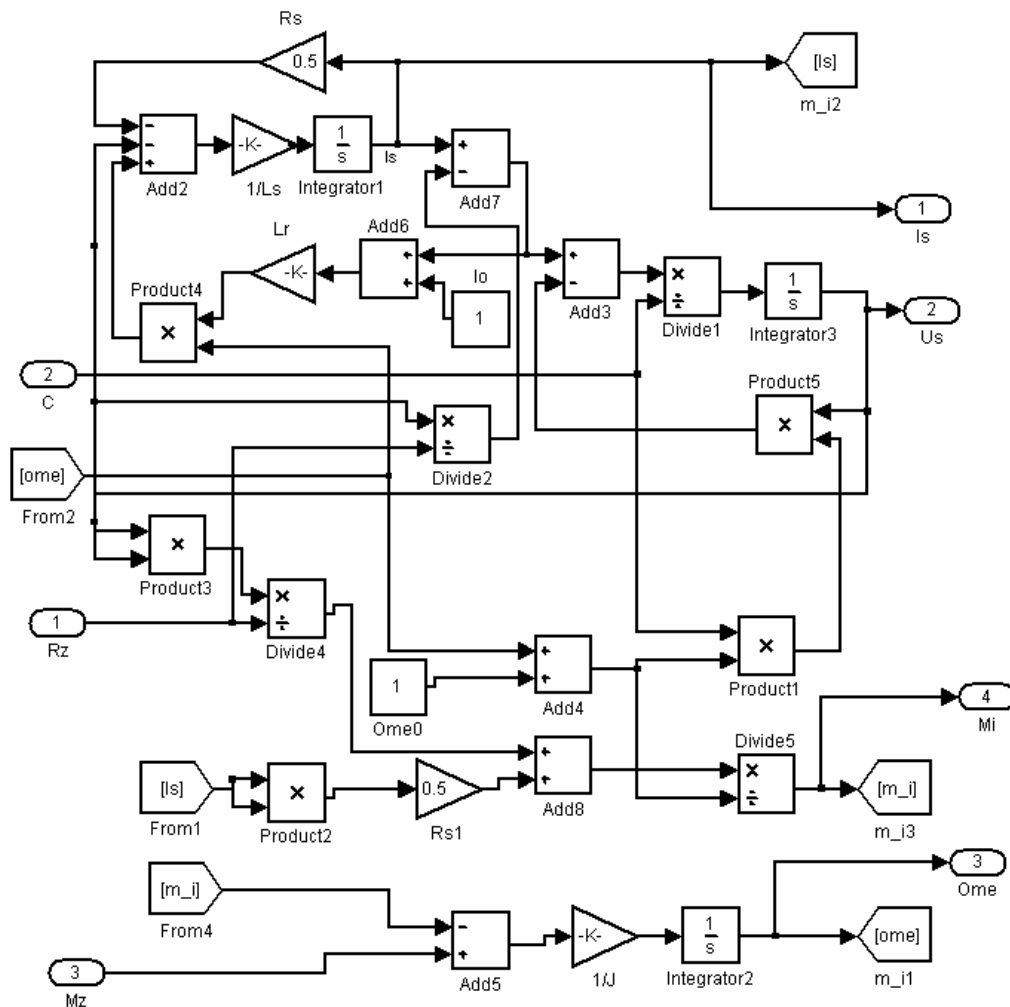
$$L_s = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_r} \right)^2 = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot 15,84} \right)^2 = 0,084 H \quad (7.15)$$

Shrnutí vypočítaných parametrů asynchronního generátoru:

$$R_s = 0,59 \Omega$$

$$L_s = L_r = 0,084 H$$

$$J = 0,1 kgm^2 \quad (\text{Odhad momentu setrvačnosti soustrojí.})$$



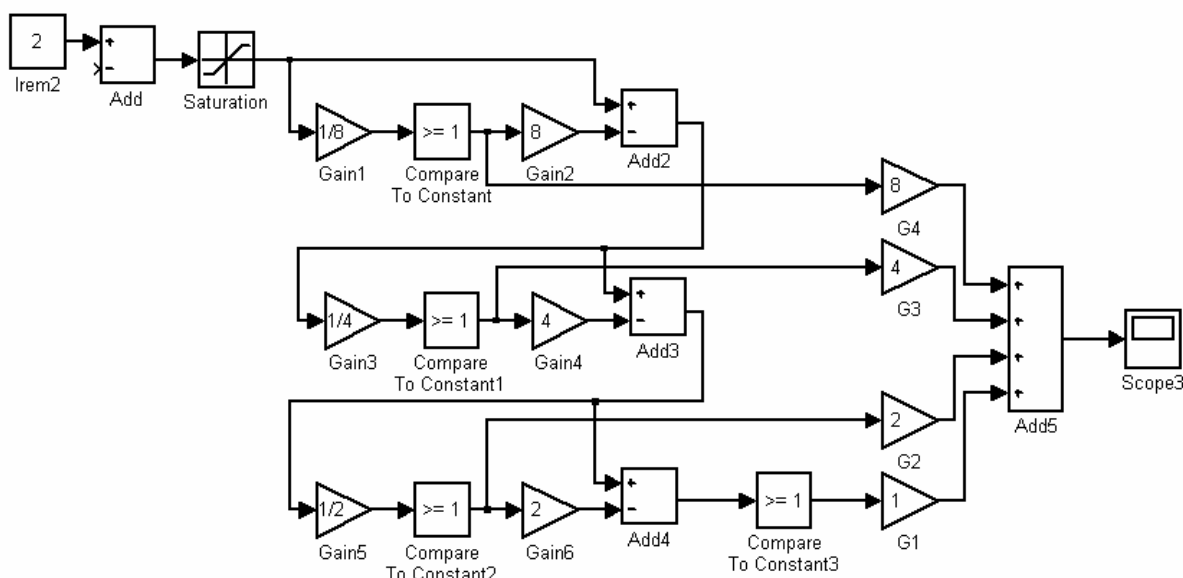
Obr.7.3 Model SEIG v programu SIMULINK

7.3 Návrh a simulace regulátoru SBJ

Samotný návrh způsobu řízení SBJ vychází z technických vlastností již zkonstruované jednotky. Řízená zátěž disponující 15 regulačními stupni má schopnost minimálního zásahu 1,5kW při napětí 230V. Tato zátěž odpovídá připojenému odporu 106Ω v každé fázi.

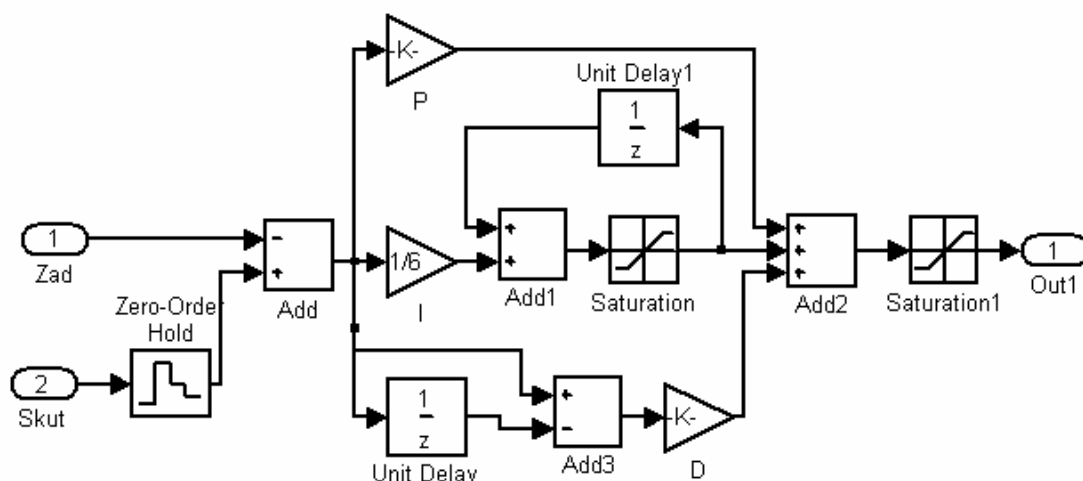
Rovněž vzorkovací perioda navrženého diskrétního PID regulátoru T_s je volena 0,3s s ohledem na použité mechanické stykače. Prostřednictvím odporové zátěže bude řízeno svorkové napětí generátoru.

Řízená kondenzátorová baterie bude použita pro regulaci otáček (výstupní frekvence) generátoru. Již dříve zmíněné časové omezení opakovatelnosti sepnutí kondenzátorových stykačů nám umožňuje zvolit vzorkovací periodu minimálně 7,5s. Přepis akčního zásahu bude probíhat 1x za 7,5s což zajistí aby stykač mohl sepnout maximálně 1x za 15s. Maximální regulační rozsah kondenzátorové baterie je $15 \times 25\mu\text{F}$. Způsob řízení odporové zátěže i kondenzátorové baterie je obdobný a je patrný z následujícího **Obr.7.4**.



Obr.7.4 Model řízení jednotlivých stupňů SBJ v programu SIMULINK

Reakce SEIG na jednotlivé regulační stupně v různých provozních režimech je zkoumána prostřednictvím modelu SEIG a zaznamenána v tabulce. V pravé části tabulky je uvedena odezva regulované veličiny.



Obr.7.5 Model diskrétního PID regulátoru v programu SIMULINK

Tab.7.1 Odezva regulované veličiny na minimální zásah SBJ

USTÁLENÝ STAV SBJ					ODEZVA NA ZÁSAH	
M [Nm]	R [Ω]	C [μF]	ω [s]	U [V]	Δω [s]	ΔU [V]
5	35	80	357	232,00		
5	35	105	317	215,00	40,00	17,00
5	35	130	283	205,00	34,00	10,00
6	53	80	346	327,00		
6	53	105	318	306,00	28,00	21,00
6	53	130	287	285,00	31,00	21,00
3	35	1075	102	89,00		
3	35	1100	100	88,00	2,00	1,00
3	35	1125	99	87,00	1,00	1,00
3	53	105	314	215,00		
3	35	105	309	175,00	5,00	40,00
3	26,5	105	307	151,00	2,00	24,00
3	53	155	260	194,00		
3	35	155	257	158,00	3,00	36,00
3	26,5	155	254	137,00	3,00	21,00
3	53	1200	97	101,00		
3	35	1200	96	86,00	1,00	15,00
3	26,5	1200	96	76,00	0,00	10,00

Z tabulky je zřejmé, že odezva na regulační zásah závisí na zatížení, otáčkách a dalších parametrech jak generátoru, tak pohonné jednotky.

Provoz každého zdrojového soustrojí se předpokládá v povolených tolerancích jmenovitého napětí a frekvence, čímž se regulační pásmo SBJ zúží. Zkonstruovaná budicí jednotka se díky „hrubosti“ regulačních stupňů nehodí pro řízení 7,5 kW generátoru na jmenovitém napětí a otáčkách, který je k dispozici v laboratořích VUT. Aby bylo možno vyzkoušet automatickou funkci SBJ, provedl jsem návrh regulátoru napětí pro oblast frekvence kolem 15 Hz, kde minimální akční zásah způsobí změnu pouze 15V.

Pomocí simulace dynamického chování modelu SEIG a záznamů z **Tab.7.1** byly odladěny parametry navrženého PID regulátoru:

Regulátor napětí: Vzorkovací perioda $T_s = 0,334 s$

Proporcionální zesílení $K_p = 0,025$

Integrační zesílení $K_I = 0,059$

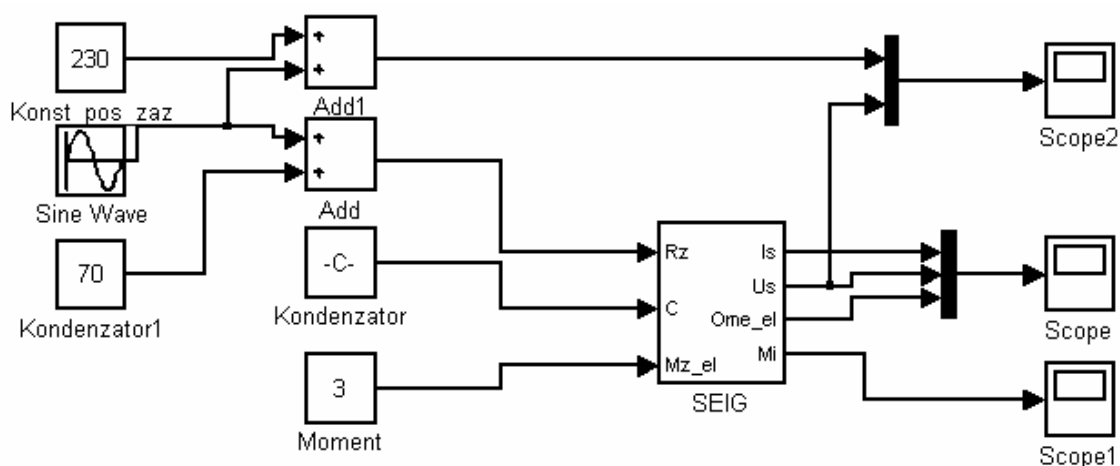
Derivační zesílení $K_D = 0,0334$

Regulátor frekvence: Vzorkovací perioda $T_s = 7,5 s$

Proporcionální zesílení $K_p = 0,1$

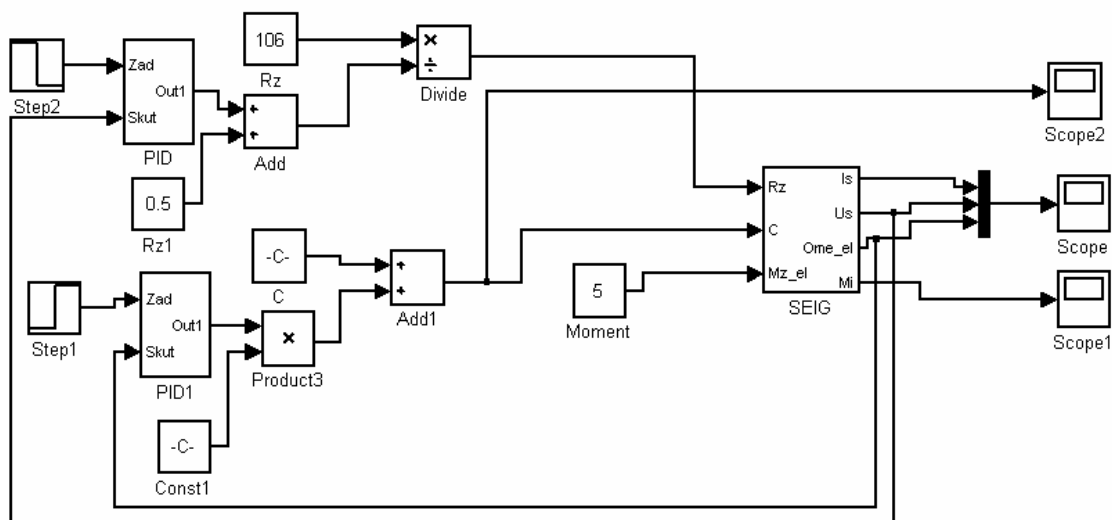
Integrační zesílení $K_I = 0,059$

Derivační zesílení $K_D = 0$



Obr.7.6 Zapojení modelu SEIG pro zkoumání jeho dynamických vlastností

Funkce regulátorů SBJ v součinnosti se SEIG o výkonu 7,5 kW byla odzkoušena na kompletním modelu, který je přehledně vyobrazen na **Obr.7.7**.

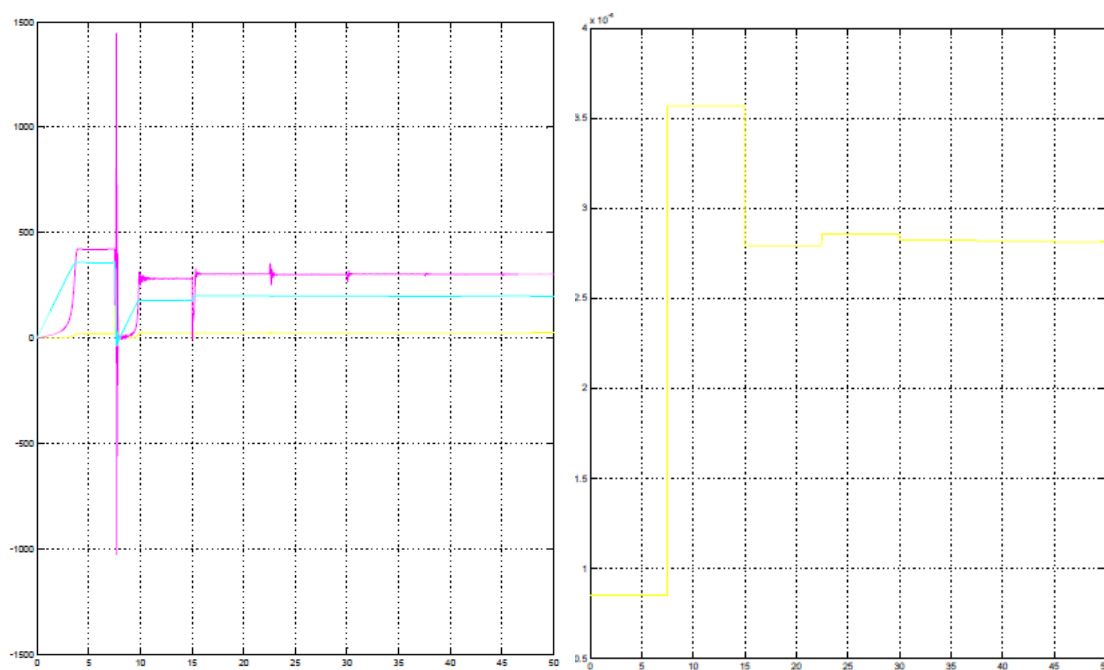


Obr.7.7 Simulace řízení SEIG statickou budicí jednotkou

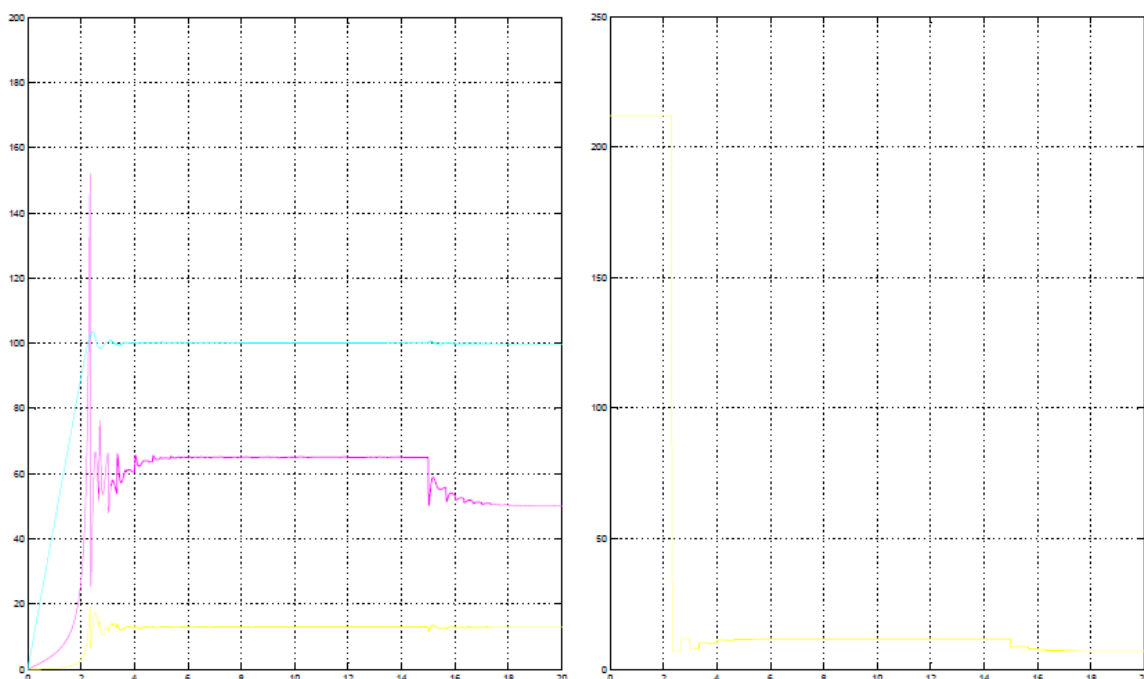
Na **Obr.7.8** a **Obr.7.9** jsou zaznamenány odezvy výstupních veličin SEIG na změnu žádané hodnoty napětí a úhlové rychlosti. Reakci regulátoru otáček je možno vysledovat z **Obr.7.8**, kde již na třetí zásah regulátoru bylo docíleno požadované úhlové rychlosti 200 rads^{-1} . Průběh odezvy napětí na požadavek změny ze 65 na 50V v patnácté sekundě záznamu je na **Obr.7.9**.

Úhlová rychlost je zaznamenána modrou barvou, napětí fialovou barvou a regulační zásah barvou žlutou.

Na základě výsledků provedených simulací byl naprogramován PLC MITSUBISHI ALFA2, který zajišťuje řízení SBJ.



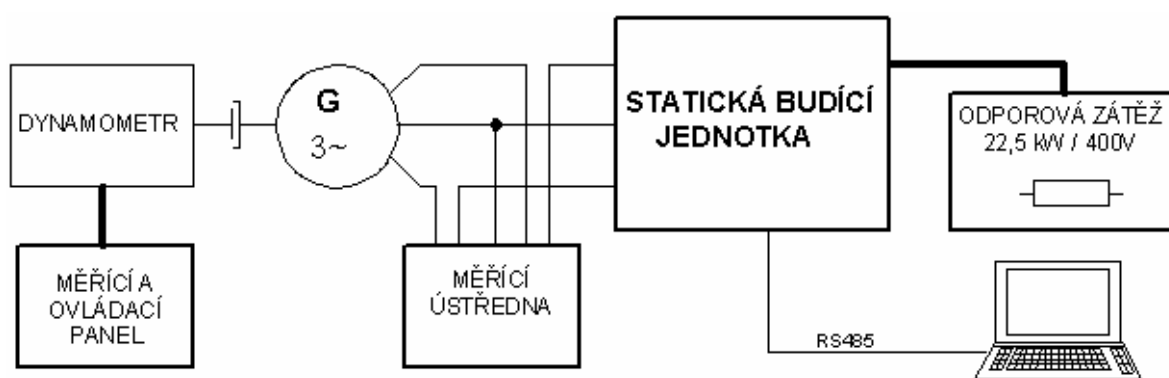
Obr.7.8 Odezva výstupů SEIG a regulátoru na změnu otáček



Obr.7.9 Odezva výstupů SEIG a regulátoru na změnu napětí

8 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE MĚŘENÍM NA SEIG

8.1 Měření SEIG v laboratořích VUT



Obr.8.1 Zapojení měřicího pracoviště

Cílem měření na generátoru bylo zjištění účinnosti asynchronního motoru v generátorovém provozu při různých provozních otáčkách a zatížení za použití statické budič jednotky. Ověření schopností SBJ řídit výstupní napětí generátoru při dynamických změnách kroutícího momentu nebo zátěže. Po sestavení měřicího pracoviště jsem nastavil dynamometr na konstantní otáčky 450 min^{-1} což odpovídá výstupní frekvenci generátoru cca 15Hz.

Po připojení maximální velikosti kondenzátorové baterie podle dříve uvedených předpokladů došlo k nabuzení generátoru a ustálení jeho výstupního sdruženého napětí na 116V. Celý průběh měření byl kontinuálně zaznamenáván prostřednictvím sériové komunikace a příslušného software na PC. Měření bylo provedeno i při 900 a 1500 ot./min. Po nabuzení generátoru, byla postupně připojována zátěž a naměřené hodnoty byly průběžně srovnávány s automaticky zaznamenávanými hodnotami. Při zatížení generátoru nad 3kW začala působit ochrana dynamometru přesto, že nebylo dosaženo jeho jmenovitých hodnot. Rovněž se potvrdil předpoklad hrubých regulačních stupňů, díky nimž se nepodařilo změřit parametry na vyšších frekvencích.

Před a po vlastním měření byla zaznamenána hodnota odporu vinutí jednotlivých fází generátoru. Z těchto zaznamenaných hodnot byla vypočtena skutečná průměrná velikost činného odporu satorového vinutí a ta použita v korigovaném zjednodušeném modelu SEIG.

U-V: 0,94Ω V-W: 1,04Ω V-W: 1,07Ω

Po ukončení měření:

U-V: 1,16Ω V-W: 1,13Ω V-W: 1,11Ω

Průměrná hodnota satorového odporu mezi fázemi:

$$R_s^* = \frac{0,94 + 1,04 + 1,07 + 1,16 + 1,13 + 1,11}{6} = 1,075\Omega$$

Hodnota odporu přepočtena na jednu fázi modelu SEIG bude:

$$R_s = \frac{R_s^*}{2} = 0,5375\Omega$$

Tab.8.1 Záznam z měření na SEIG

	DYNAMOMETR			MĚŘENÍ VÝSTUPU GENERÁTORU				VYPOČTENO	
	MOMENT [Nm]	OTÁČKY [1/min]	VÝKON [W]	f [Hz]	Us [V]	I [A]	P [W]	ΔP [W]	η [%]
1	-4,66	450	-220	14,92	116	8,06	5	215	2,27
2	-6,96	450	-329	14,86	114	7,88	117	212	35,56
3	-9,35	450	-440	14,79	111,5	7,7	232	208	52,73
4	-11,21	450	-528	14,74	108,8	7,6	321	207	60,80
5	-14,53	450	-685	14,63	102,8	7,45	478	207	69,78
6	-16,90	450	-797	14,52	96,3	7,35	588	209	73,78
7	-17,80	450	-838	14,44	90,5	7,24	631	207	75,30
8	-16,97	450	-799	14,34	79,8	6,84	606	193	75,84
9	-11,40	450	-539	14,34	59,4	5,55	408	131	75,70
10	-4,63	900	-435	29,92	248,5	10,25	8	427	1,84
11	-10,10	900	-951	29,8	244,5	10,06	518	433	54,47
12	-20,36	900	-1920	29,55	232,6	10,8	1456	464	75,83
13	-28,45	900	-2680	29,32	219	10,48	2163	517	80,71
14	-33,70	900	-3183	29,08	203	10,96	2612	571	82,06
15	-3,52	1500	-553	49,95	409	9,5	10	543	1,81
16	-12,30	1500	-1933	49,74	399	9,47	1370	563	70,87
17	-21,20	1500	-3330	49,52	385	9,74	2708	622	81,32

8.2 Porovnání naměřených výsledků

Pro porovnání naměřených výsledků s výsledky očekávanými je zapotřebí přepočítat naměřené hodnoty na jednofázový model představující 1/3 výkonu generátoru a protože se jedná o čtyřpólový stroj, je zapotřebí moment podělit dvěma, protože mechanická úhlová rychlost je oproti svorkové frekvenci poloviční. Moment jednofázového modelu proto činí 1/6 naměřeného mechanického momentu zkoušeného stroje. Měřené sdružené napětí je přepočteno na napětí fázové.

Tab.8.2 Přepočet naměřených hodnot na 1f model SEIG

MĚŘENÍ	Naměřené hodnoty			Přepočet hodnot na 1f Model		
	MOMENT [Nm]	OTÁČKY [1/min]	Us [V]	MOMENT [Nm]	ω [1/s]	U _f [V]
1	-4,66	450	116	0,78	94,25	66,97
2	-6,955	450	114	1,16	94,25	65,82
3	-9,35	450	111,5	1,56	94,25	64,37
4	-11,21	450	108,8	1,87	94,25	62,82
5	-14,53	450	102,8	2,42	94,25	59,35
6	-16,9	450	96,3	2,82	94,25	55,60
7	-17,8	450	90,5	2,97	94,25	52,25
8	-16,97	450	79,8	2,83	94,25	46,07
9	-11,4	450	59,4	1,90	94,25	34,29
10	-4,63	900	248,5	0,77	188,50	143,47
11	-10,1	900	244,5	1,68	188,50	141,16
12	-20,36	900	232,6	3,39	188,50	134,29
13	-28,45	900	219	4,74	188,50	126,44
14	-33,7	900	203	5,62	188,50	117,20
15	-3,52	1500	409	0,59	314,16	236,14
16	-12,3	1500	399	2,05	314,16	230,36
17	-21,2	1500	385	3,53	314,16	222,28

Zaznamenané hodnoty jsou vyneseny do grafů společně s hodnotami simulovanými zjednodušeným modelem SEIG. Z grafu je zřejmé, že skutečná velikost indukovaného napětí je vyšší, tak jak bylo předpokládáno již v bodě 7.2. Příčinou je skutečnost, že pro výpočet parametrů modelu bylo vycházeno ze štítkového údaje motoru, nikoli generátoru.

Na základě prvního měření byla provedena korekce indukčnosti i satorového odporu modelu SEIG a výsledky této simulace do grafu vyneseny fialovou barvou.

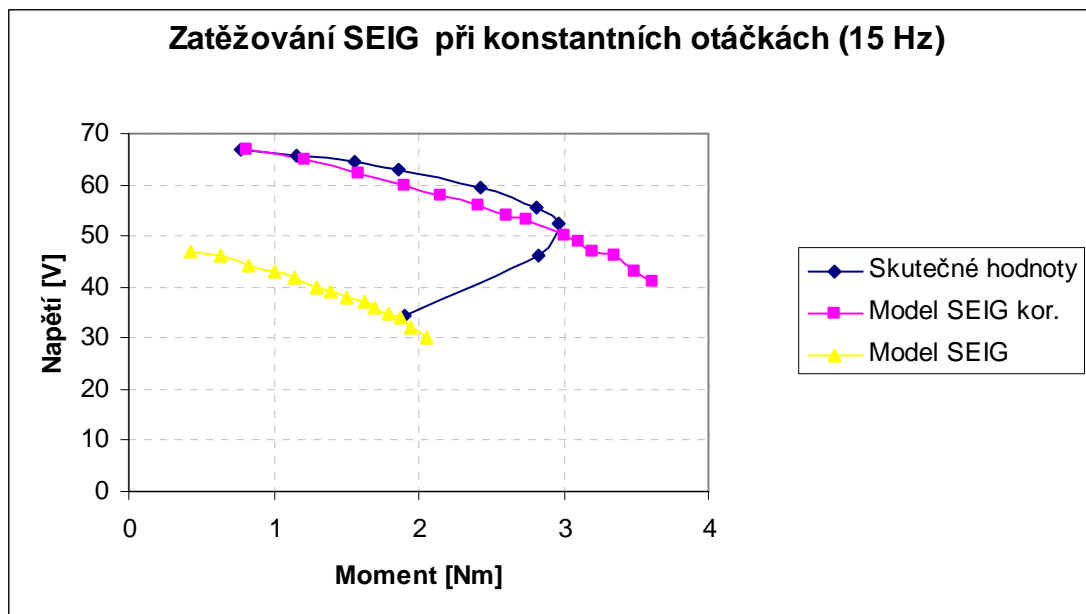
Velikost indukčnosti byla zkusmo upravena z původní hodnoty 0,084H na novou hodnotu 0,0872H, tak aby indukované napětí dosahovalo požadované hodnoty.

Korigované hodnoty modelu SEIG jsou:

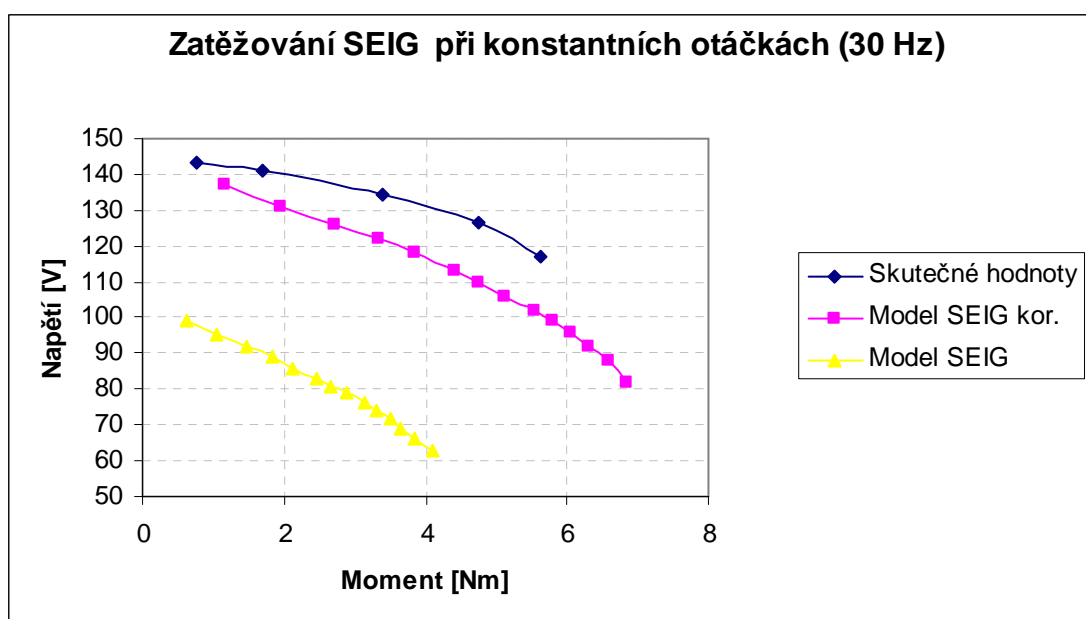
$$R_s = 0,5375 \Omega$$

$$L_s = L_r = 0,0872 H$$

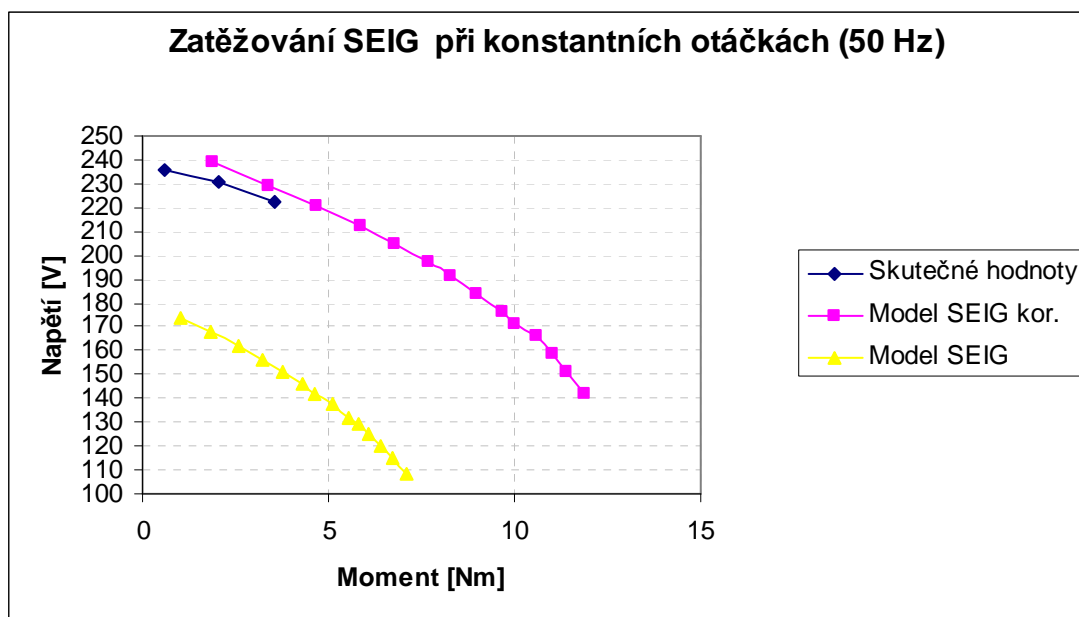
$$J = 0,1 \text{ kgm}^2 \quad (\text{Odhad momentu setrvačnosti soustrojí.})$$



Obr.8.2 Zatěžování SEIG při připojené kondenzátorové baterii 1,2mF



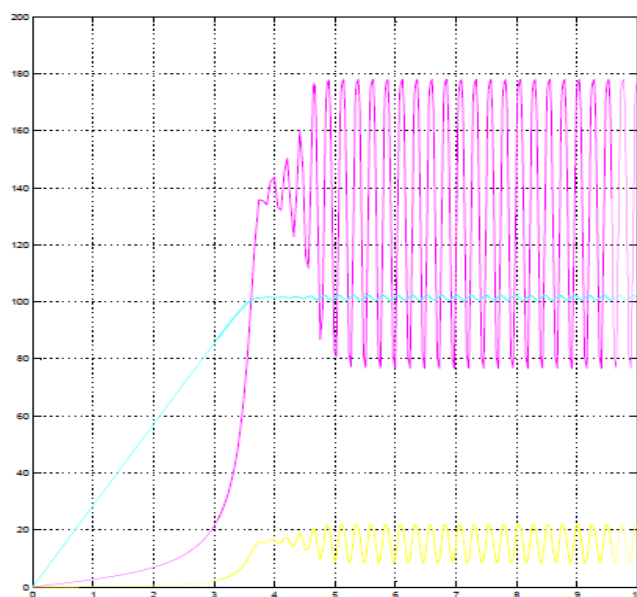
Obr.8.3 Zatěžování SEIG při připojené kondenzátorové baterii 292,5μF



Obr.8.4 Zatěžování SEIG při připojené kondenzátorové baterii 105 μ F

Snadno čitelný popis tak složitého zařízení, jako je asynchronní generátor, pouhými třemi parametry, dostatečně vyvažuje drobné nepřesnosti, které jsou ze zobrazených průběhů patrné.

Při zkoušení automatického provozu SBJ s plynule se zvyšujícím momentem měla soustava tendenci kmitat. Regulační zásah vedl k velkému zatížení, snížení otáček a odbuzení generátoru. Zpětnou simulací vzniklé situace na zjednodušeném modelu SEIG jsem zjistil, že se buzený a málo zatížený generátor s momentem do 2,5 Nm rozkmitá. Příčinou tohoto stavu je malý moment setrvačnosti soustrojí a hrubý zásah SBJ. Simulace vzniklé situace je přehledně znázorněna v grafickém záznamu na **Obr.8.5**.



Obr.8.5 Nezatížený SEIG s malým momentem setrvačnosti

9 NAsAZENÍ STATICKE BUDICÍ JEDNOTKY AG V PRAXI

9.1 Sledované parametry

Hlavním cílem prováděného měření je zjištění vzájemných závislostí jednotlivých parametrů AG buzeného statickou budicí jednotkou. V celém průběhu měření jsou zaznamenávány hlavní elektrické parametry se vzorkovací periodou 1s.

T	- Čas měření [s]
f	- Frekvence napětí [Hz]
U	- Efektivní hodnota fázového napětí [V]
I	- Efektivní hodnota proudu fáze L1 [A]
I_Z	- Vypočtená efektivní hodnota proudu zátěží [A]
I_C	- Vypočtená efektivní hodnota proudu kondenzátorovou baterií [A]
R_Z	- Vypočtená hodnota odporu zátěže v jedné fázi [Ω]
C	- Vypočtená kapacita připojené kondenzátorové baterie jedné fáze [μF]
$\cos \varphi$	- Účinník ve fázi L1 [-]
P_{L1}	- Činný výkon ve fázi L1 [W]
P	- Třífázový činný výkon [W]
Q_{L1}	- Jalový výkon ve fázi L1 [VAr]
Q	- Třífázový jalový výkon [VAr]

V tabulkách a grafech uvedené hodnoty jsou dopočítány podle vztahů:

$$I_C = \sin(\arccos \varphi) \cdot I \quad (4.1)$$

$$I_Z = \cos \varphi \cdot I \quad (4.2)$$

$$R_Z = \frac{U}{I_Z} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{I_C}{2\pi f \cdot U} \quad (4.4)$$

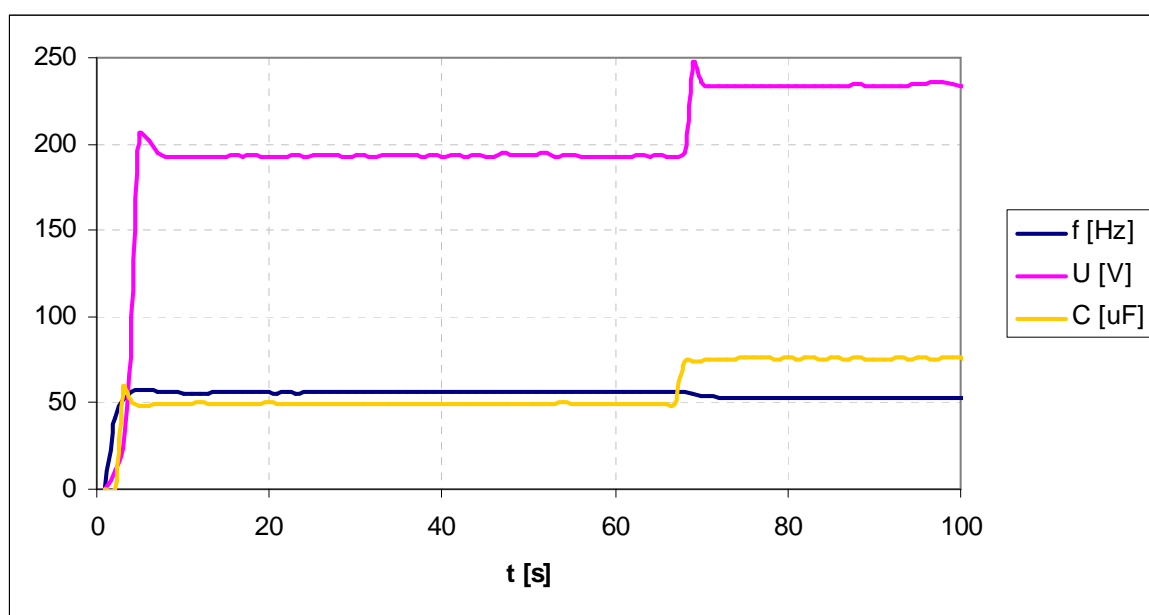
$$P = 3 \cdot P_{L1} \quad (4.5)$$

$$Q = 3 \cdot Q_{L1} \quad (4.6)$$

9.2 Buzení asynchronního generátoru 5,5kW

Jako první byl k statické budicí jednotce (SBJ) připojen asynchronní motor ve funkci generátoru poháněný Francisovou turbínou na malé vodní elektrárně pana Jiřího Roseckého v Hamrech nad Sázavou na řece Sázavě. Na této elektrárně je provozována i Bánkiho turbína řemenovým převodem spojena s asynchronním generátorem 30kW. Měření bylo prováděno dne 28.11.2012.

Štítkové údaje asynchronního motoru:	Výkon	5,5kW
	Δ	380V
	I_n	11,4A
	n	1450 ot./min.



Obr.9.1 Grafický záznam z měření nezatíženého AG 5,5kW

Cílem tohoto měření bylo zjistit závislost svorkového napětí generátoru na velikosti připojené kondenzátorové baterie. Mechanický stav turbíny neumožňoval její úplné dovření tak, aby bylo dosaženo přesné frekvence 50Hz v obou měřených případech. Z grafu je zřejmé, že pouze jeden regulační stupeň SBJ, o velikosti kondenzátoru C1 (440V/1,5kvar), ovlivní svorkové napětí generátoru v rozsahu cca 40V. V tabulce **Tab.4.1** jsou zaznamenány naměřené i dopočítané údaje ve vybraných časových intervalech podávajících dostatečnou informaci o naměřených skutečnostech. Zvýrazněný záznam v 72s měření bude porovnán s naměřenými hodnotami zatíženého generátoru, při stejné velikosti připojené kondenzátorové baterie.

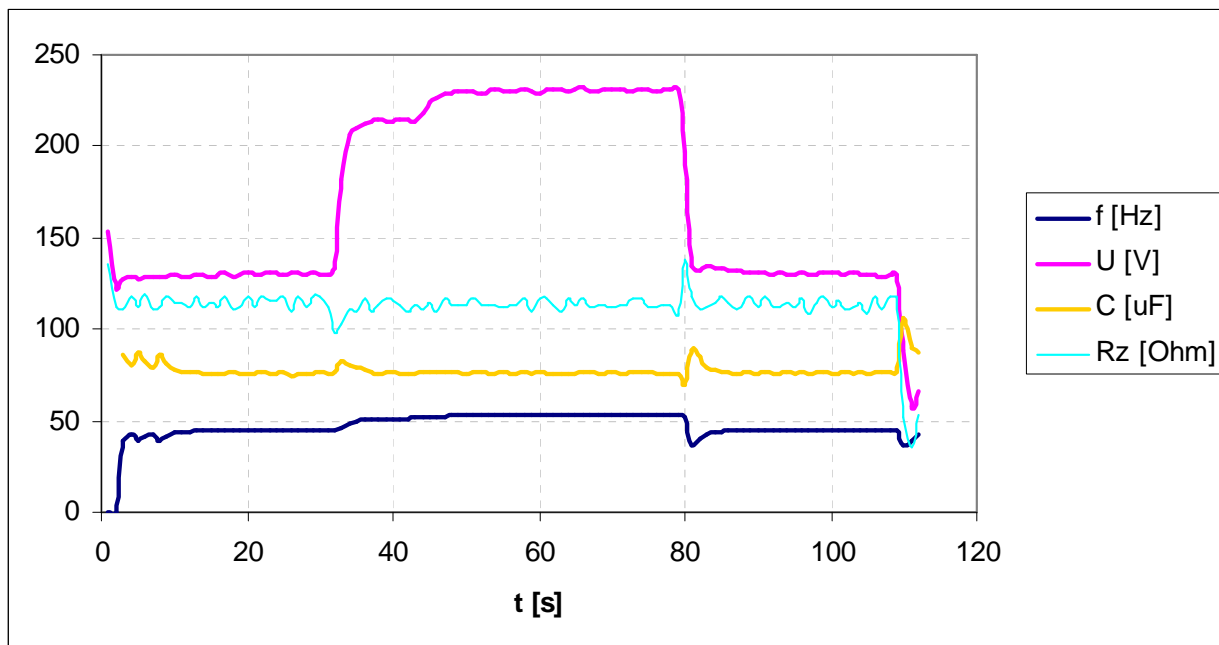
Tab.9.1 Vybrané hodnoty ze záznamu nezatíženého AG 5,5kW

Naměřené hodnoty na výstupu generátoru							Vypočtené hodnoty			
T [s]	f [Hz]	U [V]	I [A]	cos φ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	I _z [A]	I _c [A]	R _z [Ω]	C [μF]
1	0,0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00		0,00
2	41,6	11	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00		0,00
3	51,3	23	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00		0,00
4	56,4	87	1,81	0,01	0	0,42	0,02	1,81		58,71
5	57,8	205	3,72	0,02	-0,06	2,28	0,07	3,72		49,96
6	57,4	202	3,52	0,01	-0,03	2,16	0,04	3,52		48,31
7	56,6	195	3,36	0,02	-0,06	1,98	0,07	3,36		48,44
8	56,1	193	3,37	0,01	-0,03	1,95	0,03	3,37		49,53
9	55,9	192	3,34	0,00	-0,03	1,92	0,00	3,34		49,53
10	55,7	193	3,36	0,01	-0,03	1,95	0,03	3,36		49,74
67	55,8	193	3,36	0,01	-0,03	1,95	0,03	3,36		49,65
68	55,8	195	3,39	0,02	-0,06	1,98	0,07	3,39		49,58
69	55,6	247	6,35	0,01	-0,06	4,74	0,06	6,35		73,59
70	54,5	236	5,96	0,00	-0,03	4,23	0,00	5,96		73,75
71	53,7	234	5,88	0,00	-0,03	4,14	0,00	5,88		74,47
72	53,2	233	5,87	0,01	-0,03	4,11	0,06	5,87		75,36
73	52,9	233	5,85	0,01	0	4,08	0,06	5,85		75,53
74	52,8	233	5,85	0,00	0	4,08	0,00	5,85		75,68

Připojení nejmenšího stupně zátěže SBJ o velikosti 1,5kW ke generátoru vyvolalo pokles fázového napětí na 131V a pokles frekvence pod hodnotu měřicího rozsahu analyzátoru sítě. Zaznamenávané hodnoty záporného výkonu znamenají velikost dodávaného výkonu do ostrovní sítě (zátěže) reprezentované připojením příslušného počtu topných těles. Průběh zaznamenaných veličin po připojení zátěže je znázorněn na **Obr.9.2** a vybrané hodnoty jsou uvedeny v **Tab.9.2** .

Postupným zvyšováním frekvence až na hodnotu záznamu v nezatíženém stavu, dosáhlo napětí hodnoty téměř jako ve stavu bez zátěže. Porovnáním 72s měření v nezatíženém stavu a 60s měření v zatíženém stavu zjišťuji, že rozdíl ve svorkovém napětí generátoru je 4V.

Další měření na tomto generátoru jsem neprováděl, protože turbína nebyla schopna dosáhnout většího výkonu než 2,3kW.



Obr.9.2 Grafický záznam z měření zatíženého AG 5,5kW

Tab.9.2 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu zatíženého AG 5,5kW

Naměřené hodnoty na výstupu generátoru							Vypočtené hodnoty			
T [s]	f [Hz]	U [V]	I [A]	cos φ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	I _z [A]	I _c [A]	R _z [Ω]	C [μF]
20	44,5	131	2,99	0,37	-0,45	1,08	1,11	2,78	118	75,84
60	53,1	229	6,16	0,32	-1,44	3,99	1,97	5,84	116	76,39
100	44,5	131	2,99	0,39	-0,48	1,08	1,17	2,75	112	75,17

9.3 Buzení asynchronního generátoru 30 kW

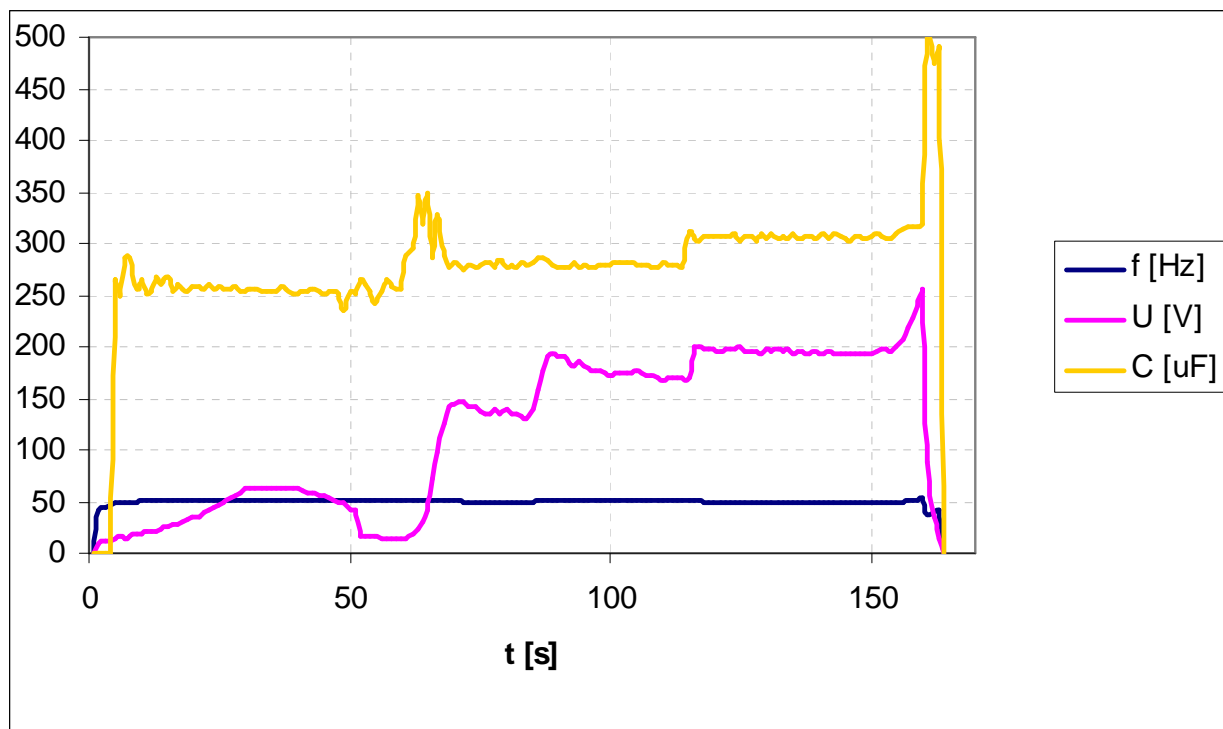
V pořadí druhý připojený motor, pracující jako generátor, je poháněn Bánkiho turbínou přes řemenový převod.

Štítkové údaje asynchronního motoru:	Výkon	30kW
	Δ	380V
	I_n	63A
	n	730 ot./min.

Na tomto generátoru v nezatíženém stavu je sledována odezva fázového napětí na postupné zvětšování kondenzátorové baterie při konstantní frekvenci. Na Obr.4.3 je zaznamenán pozvolný nárůst fázového napětí až při připojení desátého stupně kondenzátorové baterie odpovídající kapacitě 255μF jednofázového kondenzátoru (440V/15,65kvar). Po připojení této kapacity dosáhlo svorkové napětí generátoru velikosti 62V až po 40s.

Přepnutím na dvanáctý stupeň kompenzační baterie asi v 50s došlo k odpojení nabitě kapacity 68,4μF a současněmu připojení nenabitých kondenzátorů o kapacitě 100,9μF. Tento stav vyvolal při momentálním fázovém napětí 62V energetický pokles v obvodu jehož důsledkem byl výrazný pokles fázového napětí.

Při postupném připojování dalších stupňů kondenzátorové baterie fázové napětí postupně vzrůstalo. Po dosažení nejvyššího stupně připojené kondenzátorové baterie (440V/23,4kvar) byl v cca 160s manuálně připnut další kondenzátor o velikosti 440V/25kvar. Tento zásah způsobil zvýšení fázového napětí nad 253V a zapůsobení ochrany, která připojila ke generátoru odporovou zátěž odpovídající výkonu 22,5kW. Průběh tohoto děje je zaznamenán v čase od 160s.



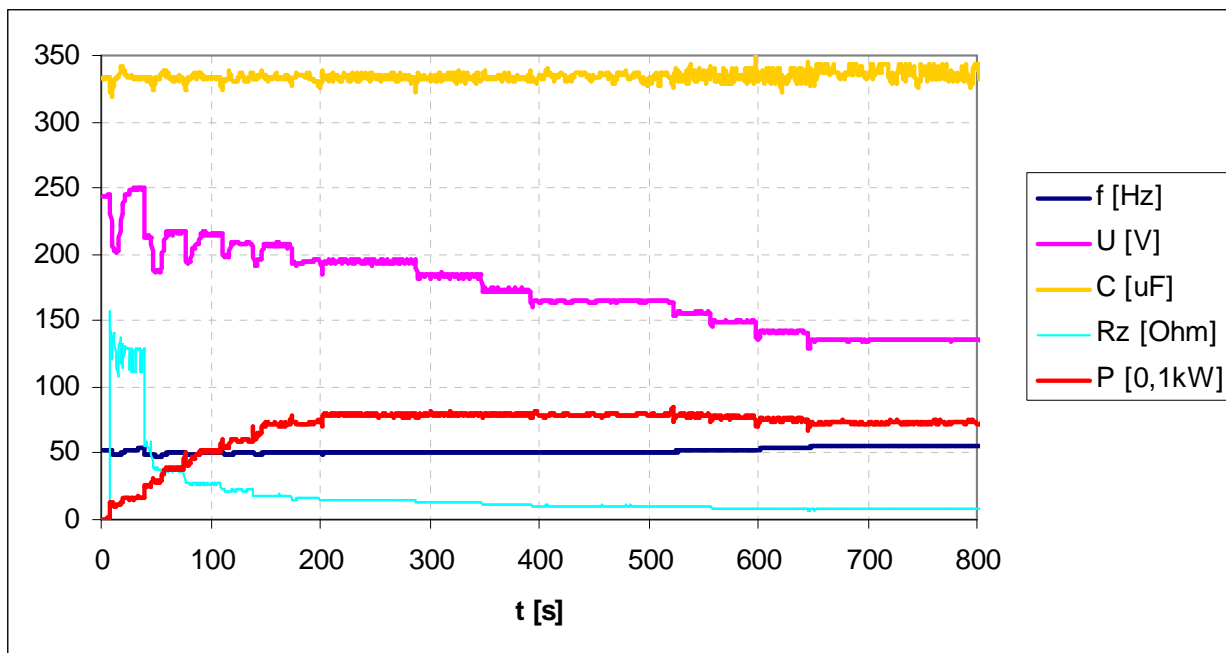
Obr.9.3 Grafický záznam z měření nezatíženého AG 30kW

Vybrané hodnoty ze záznamu prováděného měření jsou zaznamenány v níže uvedené tabulce **Tab.9.3**.

Tab.9.3 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu nezatíženého AG 30kW

Naměřené hodnoty na výstupu generátoru							Vypočtené hodnoty			
T [s]	f [Hz]	U [V]	I [A]	cos φ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	I _z [A]	I _c [A]	R _z [Ω]	C [μF]
5	47,7	14	1,11	0,08	0	0,06	0,09	1,11	157,66	263,70
40	51,6	62	5,05	0,03	0,03	0,93	0,15	5,05	409,24	251,12
60	51,8	14	1,17	0,09	0	0,06	0,11	1,17	0,11	255,73
70	50,4	144	12,80	0,01	0,09	5,55	0,13	12,80	1125,0	280,68
85	49,6	140	12,30	0,01	0,09	5,16	0,12	12,30	1138,2	281,90
90	51,3	191	17,10	0,00	0,03	9,87	0,00	17,10		277,76
115	50,4	169	16,70	0,00	-0,06	8,31	0,00	16,70		312,05
118	49,9	197	19,00	0,00	-0,06	11,28	0,00	19,00		307,61
150	49,5	194	18,50	0,00	0,06	10,83	0,00	18,50		306,61
160	53,0	253	26,90	0,00	0,06	20,28	0,00	26,90		319,28

Cílem dalšího měření bylo zjištění závislosti fázového napětí generátoru na zatížení při konstantní frekvenci a konstantní kompenzační baterii. Měření bylo prováděno při sepnutém patnáctém stupni kondenzátorové baterie odpovídající jednofázovému kondenzátoru o kapacitě 376,8 μ F. Pro přehlednost zobrazeného grafu je výkon odebíraný zátěží násoben konstantou -10.



Obr.9.4 Grafický záznam z měření zatěžovaného AG 30kW

Z výše uvedeného grafického záznamu je zřejmá závislost fázového napětí generátoru na zatížení až do 200s měření, kde nastává zlom po kterém generátor pracuje jako zdroj konstantního výkonu, bez ohledu na velikost zátěže. Vybrané hodnoty z grafického záznamu jsou uvedeny v tabulce **Tab.9.4**.

Tab.9.4 Vybrané hodnoty ze záznamu provozu zatěžovaného AG 30kW

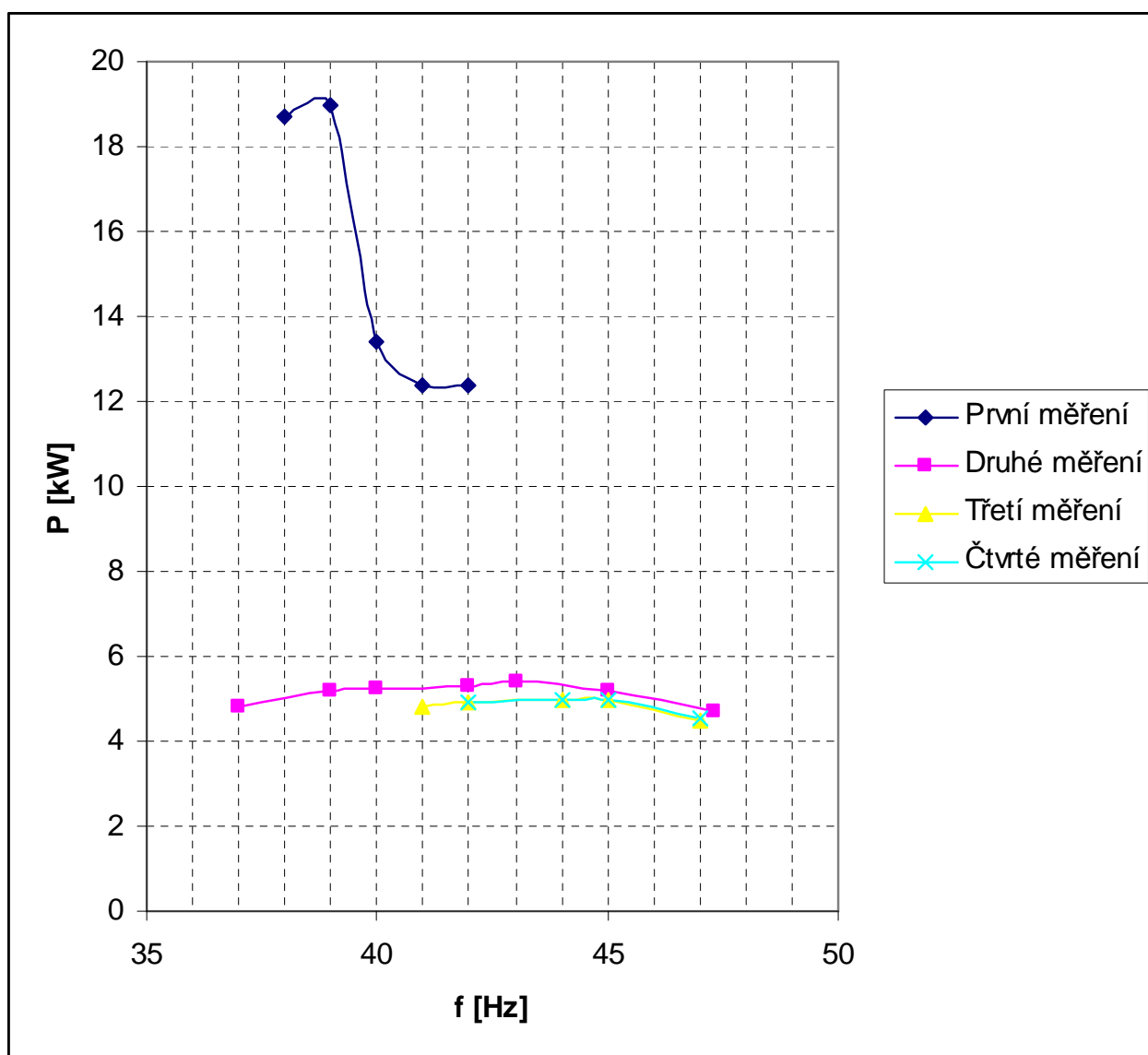
Naměřené hodnoty na výstupu generátoru							Vypočtené hodnoty			
T [s]	f [Hz]	U [V]	I [A]	cos φ [-]	P [kW]	Q [kVAr]	I_z [A]	I_c [A]	R_z [Ω]	C [μ F]
10	50,4	210	21,40	0,08	-1,23	13,44	1,71	21,33	122,66	320,77
40	49,7	213	22,40	0,17	-2,52	14,19	3,81	22,07	55,93	331,87
70	50,2	218	23,50	0,24	-3,75	14,94	5,64	22,81	38,65	331,78
100	50,4	216	24,00	0,32	-5,07	14,73	7,68	22,74	28,13	332,42
130	50,1	208	23,80	0,40	-6,09	13,59	9,52	21,81	21,85	333,15
160	50,4	206	24,70	0,46	-7,17	13,53	11,36	21,93	18,13	336,20
230	50,2	195	24,50	0,55	-7,98	11,94	13,48	20,46	14,47	332,67
330	50,2	184	24,00	0,58	-7,80	10,74	13,92	19,55	13,22	336,87
370	50,5	172	23,70	0,64	-7,98	9,36	15,17	18,21	11,34	333,67
470	50,9	165	23,70	0,68	-7,98	8,58	16,12	17,38	10,24	329,30
550	51,6	156	23,70	0,69	-7,77	7,98	16,35	17,15	9,54	339,17
590	52,5	149	23,70	0,73	-7,83	7,26	17,30	16,20	8,61	329,55
630	53,7	141	23,70	0,73	-7,47	6,84	17,30	16,20	8,15	340,47
700	55,0	135	23,70	0,75	-7,23	6,36	17,78	15,68	7,59	336,02

9.4 Měření pracovní charakteristiky vodního motoru pomocí SBJ

V rámci testování statické budič jednotky byla na MVE p. Roseckého změřena pracovní charakteristika Bánkiho turbíny.

Vzhledem ke špatné hydrologické situaci se nepodařilo charakteristiku přeměřit na větším výkonu než 6kW. Celkem byla provedena čtyři měření. První a třetí měření bylo prováděno tak, že nabuzený generátor s připojenou zátěží pracující na frekvenci 35Hz byl postupně odbuzován. Pokles fázového napětí vždy vyvolal odlehčení generátoru a zvýšení otáček. Takto byla charakteristika zaznamenána v rozsahu frekvence generátoru od 35 do 50Hz. Druhé a čtvrté měření bylo provedeno tak, že od frekvence 50Hz byl generátor postupně přibuzován, čím se zvedalo fázové napětí, zvyšovalo se zatížení generátoru a postupně klesaly otáčky.

Záznam tohoto měření je uveden na **Obr.4.5**. Průběh prvního měření reprezentuje neúspěšný pokus o zjištění optimálních otáček turbíny na výkonu 20kW. Příčinou propadu výkonu, při frekvenci 40Hz, byla ztráta vodního spádu na turbíně, proto k tomuto měření nemůže být přihlíženo.



Obr.9.5 Závislost výkonu vodního motoru na otáčkách

Naopak další měření poskytují cennou informaci, že optimální otáčky Bánkiho turbíny s největší pravděpodobností odpovídají frekvenci 43Hz. Z výrazného poklesu výkonu při frekvenci blížící se 50Hz lze usuzovat, že za dvacet roků provozu této turbíny mohl majitel přijít až o desítky procent zisku z vyrobené energie. Pro ověření zjištěné skutečnosti bude nutné provést opakované měření při příznivé hydrologické situaci v celém rozsahu dosažitelného výkonu turbíny.

10 ZÁVĚR

Cílem této práce je seznámení případných zájemců s problematikou provozu malých vodních elektráren z pohledu elektrotechnologické koncepce. Podrobný rozbor možností využití asynchronních generátorů a principu jejich funkce tvoří dostatečný podklad k pochopení základních zákonitostí, prakticky využitelných provozovateli alternativních zdrojů energie.

V kapitole 2.5 je názorným způsobem předveden výpočet potřebné kondenzátorové baterie pro vykompenzování jalového výkonu asynchronního generátoru tak, aby jeho účinník, při paralelní práci s distribuční sítí, byl v celém rozsahu výkonu v intervalu 0,95 až 1, jak je požadováno provozovateli distribučních soustav.

Kapitola 5 na základě popisované problematiky shrnuje uvedené poznatky do návrhu konkrétní aplikace řízení asynchronního generátoru.

Statická budicí jednotka, tak jak byla navržena a zkonstruována rozšiřuje využití asynchronních generátorů doposud pracujících výhradně paralelně s distribuční sítí o možnosti, které doposud nabízely pouze generátory synchronní. Zapojení a způsob řízení kondenzátorové baterie jednotce zajišťuje mnohostranné uplatnění pro asynchronní generátory výkonu jednotek až stovek kilowattů.

Zjednodušený matematický model SEIG poskytuje možnost snadné simulace konkrétního generátoru pouze na základě znalostí údajů uvedených na výrobním štítku.

Protože je statická budicí jednotka navržena jako mobilní, umožňuje změření a zaznamenání pracovní charakteristiky jakékoli pohonné jednotky buzeného generátoru. Zejména optimální návrh pracovních otáček vodních motorů může mít pro provozovatele významný ekonomický přínos. Pro zjištění optimálních otáček vodního motoru postačí do grafu vynést závislost výkonu na frekvenci při konstantním spádu a otevření turbíny.

Výstupy této práce nabízí širokému spektru provozovatelů malých vodních elektráren s asynchronními generátory řešení možnosti ostrovního provozu. Dále v návaznosti na požadavky provozovatelů distribučních soustav nabízí SEIG možnost bezrázového připojování k distribuční síti a tím snížení nákladů na instalovaný příkon a dimenzování hlavního jističe.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MACHNÍČKA, L.; SLÁDEK, I. *Současný stav a výhled užití obnovitelných zdrojů energie v ČR*, Praha: ČSSE Praha.
- [2] Společné stanovisko ERÚ a SEI, Praha. [citováno 23.5.2013] Dostupné z:
<http://www.eru.cz/user_data/files/sdeleni_elektro/Stanovisko%20ERÚ%20SEI%20k%20MVE.pdf>
- [3] E.D.Basset, F.M. Potter, *Capacitive Excitation of Induction Generators*, Electrical Engineering, vol.54, 1935, pp.540-545
- [4] E.ON., *Pravidla provozování distribuční soustavy*. [citováno 23.5.2013] <<http://www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektřiny/predpisy.shtml>>
- [5] [citováno 23.5.2013] <http://www.teslasociety.com/hall_of_fame.htm>
- [6] ONDRŮŠEK, Č., *Elektrické stroje*. [citováno 23.5.2013]
<http://www.uvee.feec.vutbr.cz/Predmety/BESB/Skripta/elektricke_stroje.pdf>
- [7] Katalog SIEMENS, K15-0409 CZ
- [8] Katalog ZEZ SILKO. [citováno 23.5.2013] <<http://www.zez-silko.cz>>
- [9] ION BOLDEA, SYED A. NASAR, *The Induction Machine Handbook* (Electric Power Engineering Series), ISBN / ASIN: 0849300045
- [10] ION BOLDEA, *Variable Speed Generators* (Electric Power Engineering Series), ISBN / ASIN: 0849357152
- [11] Katalog Schneider Electric, Stykače TeSys

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	magnetická indukce [T]
C	kapacita kondenzátoru [F]
$\cos \varphi$	účinník [-]
dU	změna napětí [V]
dt	časový úsek [s]
F	síla působící na vodič [N]
f	frekvence [Hz]
I	elektrický proud [A]
I_{ef}	efektivní hodnota proudu [A]
I_{\max}	maximální hodnota proudu [A]
$I_{0\max}$	maximální hodnota magnetizačního proudu [A]
I_{0ef}	efektivní hodnota magnetizačního proudu [A]
J	moment setrvačnosti [kgm^2]
L	indukčnost [H]
l	délka vodiče [m]
M_{\max}	maximální moment [Nm]
n	otáčky rotoru [s^{-1}]
P	výkon [W]
Q	- Jalový výkon [VAr]
R_s	odpor statoru [Ω]
S	- Zdánlivý výkon [VA]
s	skluz [-]
s_n	jmenovitý skluz [-]
s_{\max}	maximální skluz [-]
T	perioda [s]
U	svorkové napětí generátoru [V]

U_{ef}	efektivní hodnota fázového napětí [V]
U_{max}	maximální hodnota napětí [V]
v	rychlost pohybujícího se vodiče [$m\ s^{-1}$]
Φ	magnetický indukční tok [Wb]
φ	fázový úhel mezi napětím a proudem [$^{\circ}$]
AM	asynchronní motor
AG	asynchronní generátor
ERÚ	energetický regulační úřad
MVE	malá vodní elektrárna
PWM	pulsní šířková modulace
PPDS	pravidla provozovatelů distribučních soustav
SBJ	statická budicí jednotka
SEIG	buzený asynchronní generátor (Self Excited Induction Generator)